

Компьютерная графика

Введение

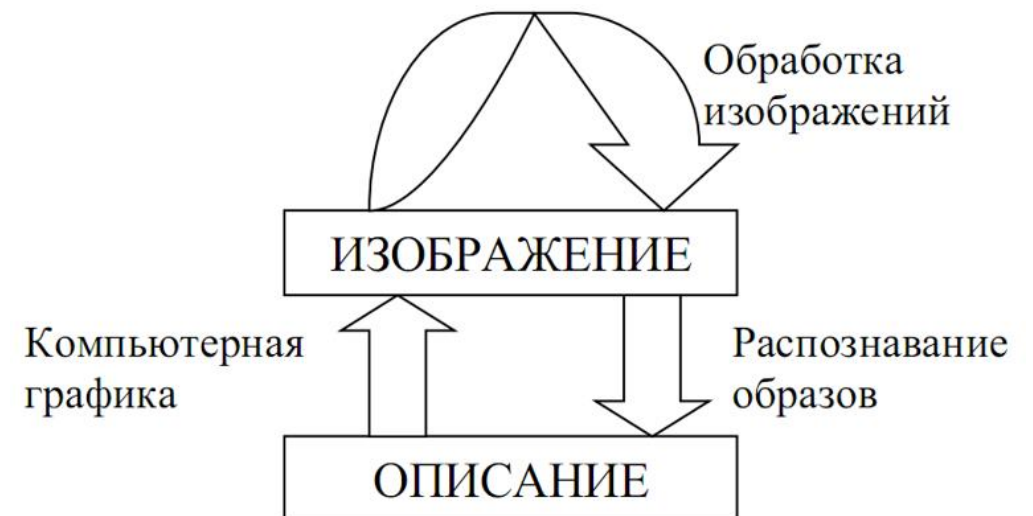
Лектор: Демяненко Я.М., 4-й курс ФИИТ, 2026

Содержание

1. Что такое компьютерная графика?
2. Где используется?
3. Математические основы
4. Практический стек
5. Классификация
6. Исторический экскурс (1940–2026)
7. 🔥 Конвейер рендеринга (от модели к пикселю)
8. Real-Time vs Offline рендеринг
9. Современные тренды
10. Примеры работ студентов
11. Литература, конференции

Компьютерная графика

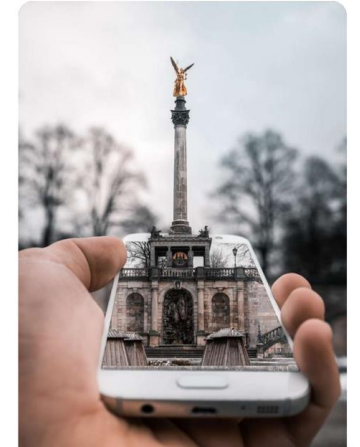
- это не просто «рисование картинок»
- это наука о синтезе, обработке и визуализации изображений и данных с помощью компьютера
- мы будем писать код, который вычисляет каждый пиксель



Где используется графика?



+ =



Актуальность для ФИИТ

 Научная визуализация: Рендеринг данных моделирования (климат, физика частиц, биология)

 CV (Computer Vision): Обратная задача — анализ изображений. Графика синтезирует, vision анализирует

 Виртуальная и дополненная реальность (VR/AR)

 Машинное обучение: Генерация синтетических данных, стиль-трансфер, работа с GANs

 И конечно — игры, кино, дизайн

Вакансии/роли:

Graphics Programmer (Rendering Engineer) — пишет шейдеры и оптимизирует батчи

Tech Artist — связующее звено между художниками и программистами

Computer Vision Engineer — обратная задача (анализ)

Математические основы синтеза изображений



Линейная алгебра (основа всего)

Векторы (нормали, лучи света, направления)
Матрицы 4x4 (поворот, перенос, масштаб, проекция — Model/View/Projection)



Аналитическая геометрия

Пересечение прямой (луча) с плоскостью, сферой, треугольником (основа Ray Tracing)
Вычисление нормалей к поверхностям



Цветовое пространство и оптика

Уравнение рендеринга (как свет взаимодействует с материалом)



Для продвинутых тем

Численные методы (интегралы для глобального освещения)
Теория сигналов (сглаживание/антиалиасинг)

Практический стек курса

1. Язык: **C++17/20** (основной для модуля 3) или **C#** (основной для 1-2) или на ваш выбор

2. Графический API :

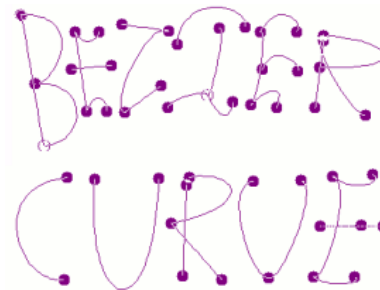
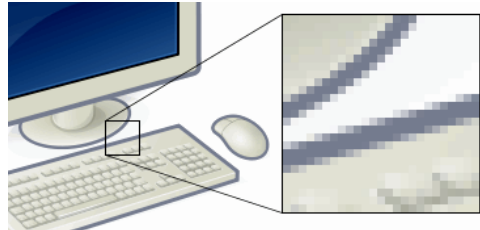
- **OpenGL 4.6 Core Profile** (реальный стандарт индустрии) — пишем шейдеры на GLSL

3. Вспомогательные библиотеки (чтобы не изобретать велосипеды):

- **GLFW / SDL** — создание окна и обработка ввода
- **GLAD / GLEW** — загрузка функций OpenGL
- **GLM** (OpenGL Mathematics) — готовая линейная алгебра (векторы, матрицы) — **главный инструмент**
- **Assimp** — загрузка сложных 3D-моделей (форматы .obj, .fbx)
- **stb_image** — загрузка текстур (форматы .png, .jpg)

Классификация компьютерной графики

	Растр	Вектор	Фрактал
Суть	Матрица пикселей	Геометрические формулы	Рекурсивная функция
Масштаб	✗ Потеря качества	✓ Без потерь	✓ Бесконечная детализация
Пример	Фото, игры, экран	Логотипы, шрифты, CAD	Мандельброт, природа
Главное	Рендеринг (цвет каждого пикселя)	Описание формы	Итерация (сходимость)



Эволюция задач



1940-70: "Как нарисовать линию/точку?" (Математика)



1970-90: "Как нарисовать 3D-объект?" (Алгоритмы, Z-буфер)



1990-2010: "Как нарисовать реалистично?" (Текстуры, Шейдеры, Физика)



2010-н.в.: "Как нарисовать мгновенно и интерактивно?" (RTX, ML-апскейлинг)

А вот как мы к этому пришли: экскурс в историю

1940 –
1970 гг.

1971 –
1985 гг.

1986 –
1990 гг.

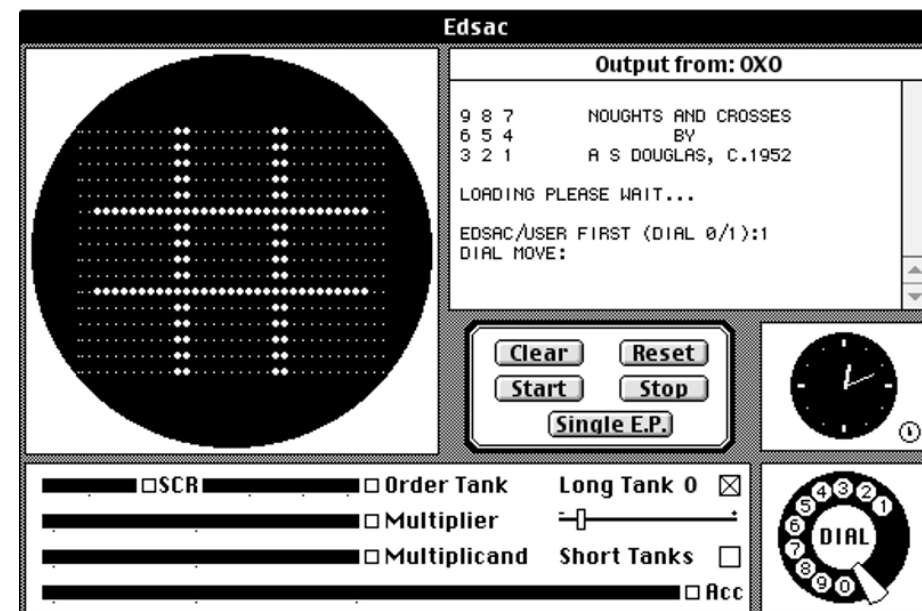
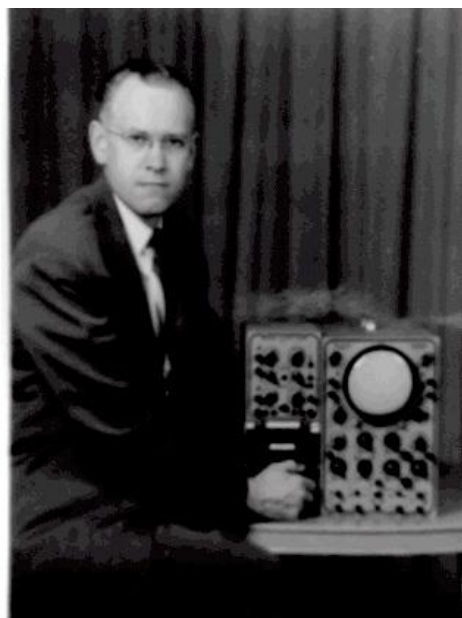
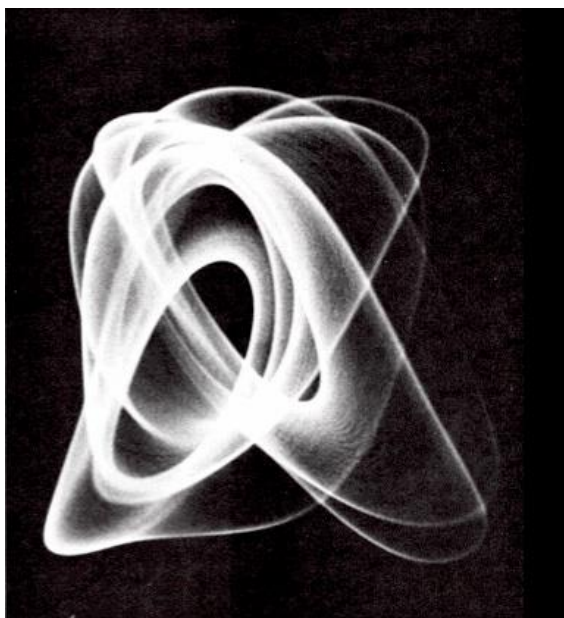
1991 –
2026 гг.

1940-1970гг.

- Время больших компьютеров (эра до персональных компьютеров)
- Графикой занимались только при выводе на принтер
- В этот период заложены математические основы
- Особенности:
 - пользователь не имел доступа к монитору
 - графика развивалась на математическом уровне и выводилась в виде текста, напоминающего на большом расстоянии изображение
 - графопостроители появились в конце 60-х годов и практически были не известны

[illegible]

Рисунок на осциллографе



В 1950 году Бенджамин Лапоски (1914–2000), математик, художник и чертежник, начал экспериментировать с рисованием на осциллографе

Первая наглядная компьютерная игра - OXO, или крестики-нолики. Александр Дуглас для компьютера [EDSAC](#) в рамках кандидатской диссертации как пример взаимодействия человека с машиной

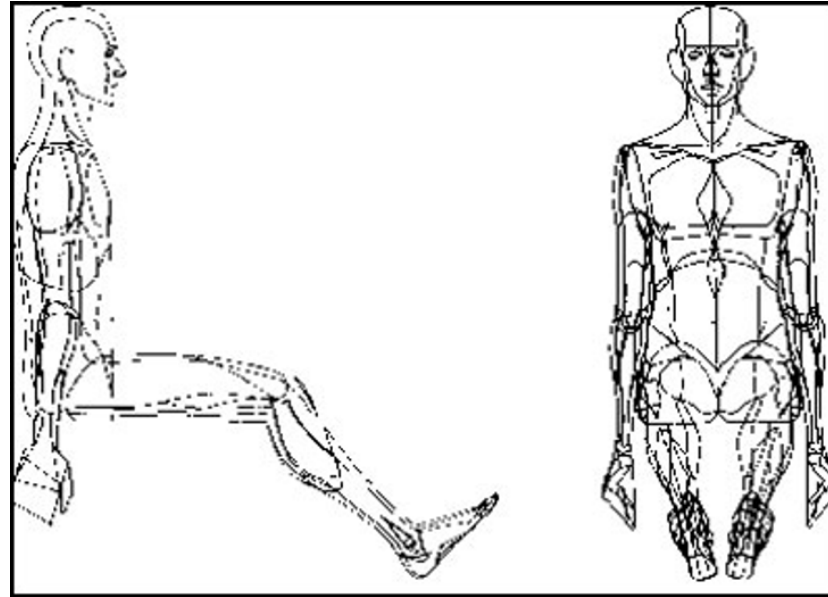
Ввод данных осуществлялся дисковым номеронабирателем
Вывод выполнялся матричной электронно-лучевой трубкой

Уильям Феттер (William Fetter)



14 марта 1928 г. – 23 июня 2002 г.

термин
Computer Graphics
в 1960



Человек Боинга

Результатом трудов Уильяма Феттера в 1964 году стала ортогональная проекция человеческой фигуры, которая была известна под именем «**Boeing man**»

Стив Рассел: Spacemar!



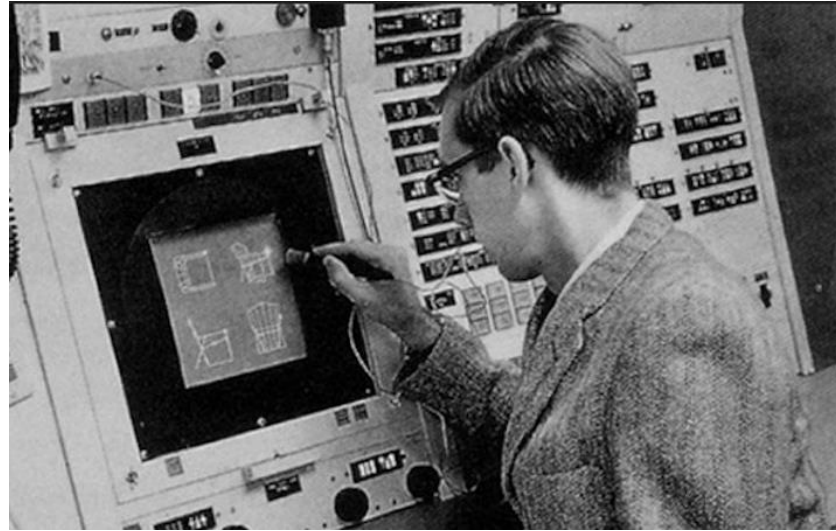
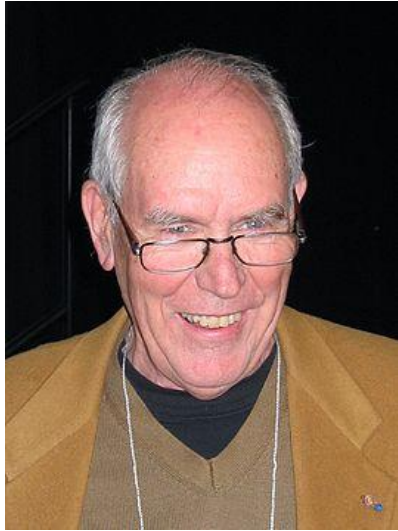
Создание игры **Spacewar!**
(1961-1962) заняло около 200
человеко-часов

Игра была создана на машине
DEC PDP-1

Двухмерная векторная графика
KSpaceDuel, современная версия,
включенная во многие
дистрибутивы Linux

Стив Рассел 1937 год (89 лет) возглавил проект (студенты Массачусетского технологического института) по созданию **первой** (второй) **графической компьютерной игры**

Айвен Эдвард Сазерленд



16 мая 1938 (88 лет)



- Американский учёный в области информатики и пионер интернета
- Получил **премию Тьюринга** от ACM (Ассоциации вычислительной техники) **в 1988 за «Sketchpad»**
- В 2012 удостоен премии Киото за ту же разработку
- Программно-аппаратный комплекс **Sketchpad**, который позволял рисовать точки, линии и окружности на трубке цифровым пером
Поддерживались базовые действия с примитивами
- По сути, это был первый векторный редактор — **прообраз будущих САПР**
- В **1968** году создал то, что считается **первым шлемом виртуальной и дополненной реальности** — Дамоклов Меч
- Шлем был примитивным как с точки зрения интерфейса, так и по реализму изображения, а его вес был таким большим, что он подвешивался к потолку
- Виртуальная среда состояла из простых каркасных моделей комнат

Николай Константинов (1932-2021)

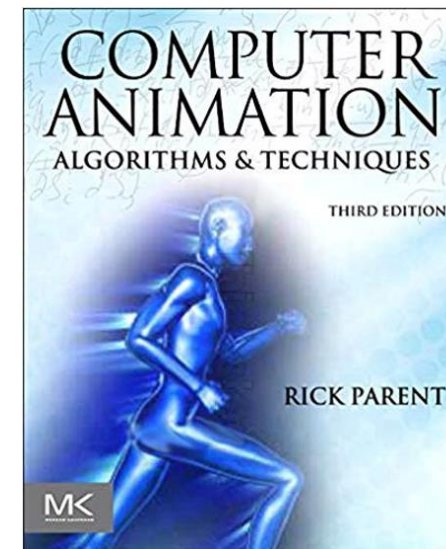


Николай Константинов:

«Знает ли кошка,
что она
не настоящая?»

Левонид Левкович-Маслюк
[levkov@computer.ru]

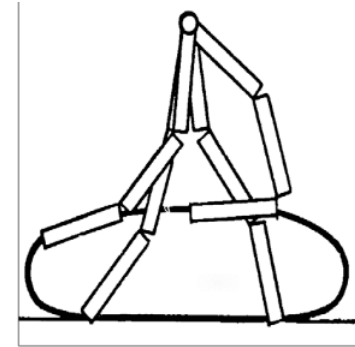
Автор монографии «**Computer Animation: Algorithms and Techniques**», специалист по анимации человеческих фигур, а также по истории компьютерной анимации



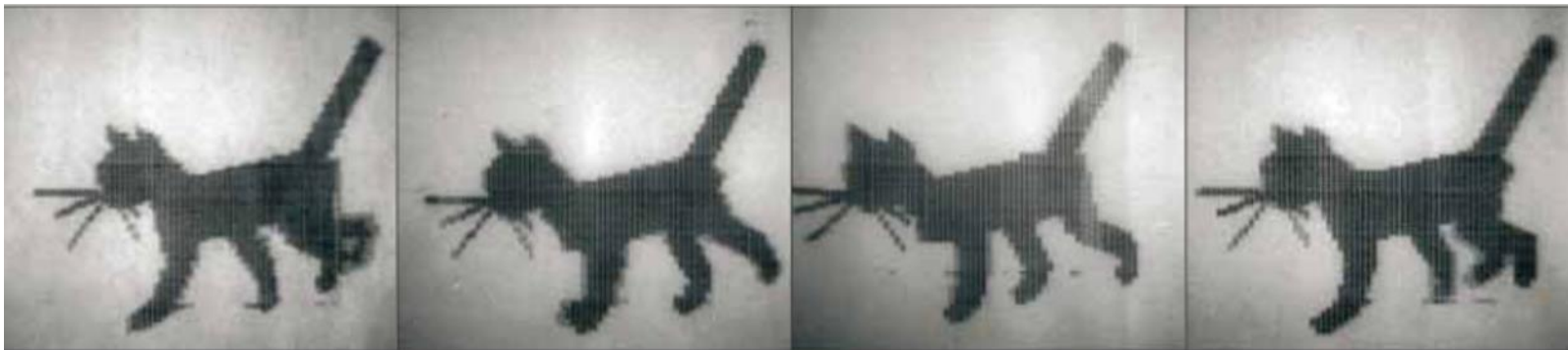
Первая реакция Рика на просмотр «Кошечки»:
«Это ПРЕКРАСНАЯ анимация! Я от нее в восторге.
Если не возражаете, я покажу ее сегодня студентам на занятиях»

Кошечка (1968)

- **Первый в мире мультфильм, нарисованный компьютером**
- Группа под руководством Николая Николаевича Константинова создала математическую модель движения кошки
- Машина БЭСМ-4, выполняя написанную программу решения, нарисовала мультфильм "Кошечка"



траектория лап кошки, задаваемая дифференциальными уравнениями



Юрий Баяковский (1937 — 2014)

1990 на SIGGRAPH ассоциацией ACM
присвоен титул «Computer Graphics
Pioneer»



1971-1985гг.

Появились персональные компьютеры, т.е. появился доступ пользователя к дисплеям

Роль графики резко возросла, но наблюдалось очень низкое быстродействие компьютера

Программы писались на ассемблере

Появилось цветное изображение (256)

Особенности: этот период характеризовался зарождением реальной графики

70-ые и 80-ые гг

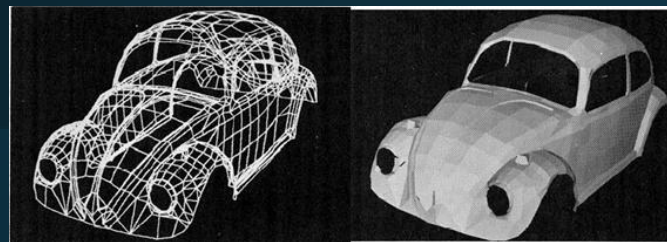
В 1972 году

Айвена Сазерленд со своими учениками создал сгенерированное компьютерной графикой трехмерное изображение, которое впервые в истории выглядело точно так же, как его физический оригинал, — Фольксваген-жук (Volkswagen Beetle)

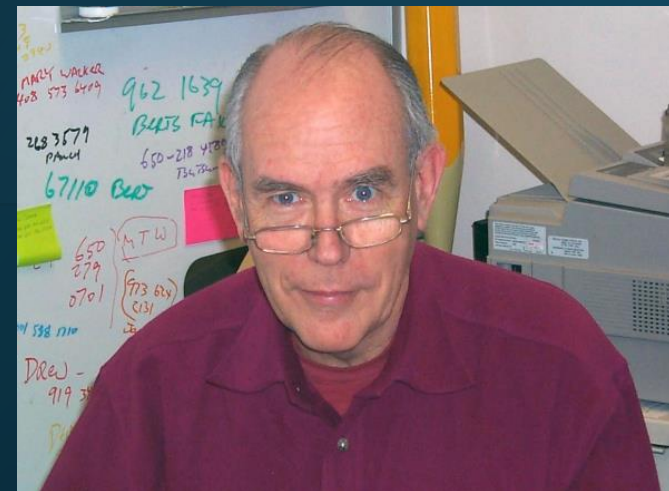
Автомобиль, взятый у Марши, жены Айвена, пришлось вручную разбивать на полигоны, координаты которых затем вводились в графический редактор Sketchpad



А кто же был среди «муравьев»-студентов Сазерленда?



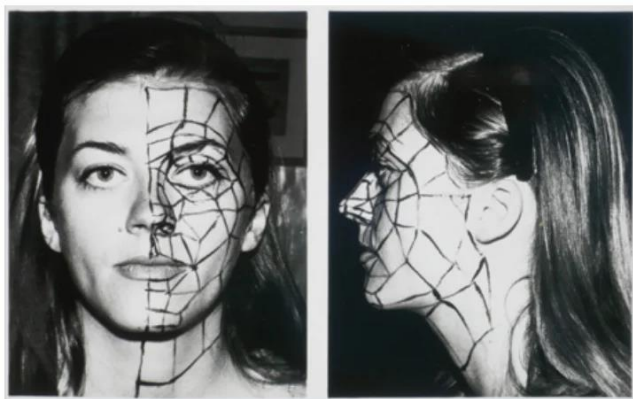
Первая 3D-модель автомобиля



Среди его студентов были:

- Анри Гуро, придумавший метод тонирования Гуро
- Буй Фонг, придумавший метод тонирования Фонга и модель освещения Фонга
- Франклин Кроу, разработавший методы антиалиасинга
- Эдвин Катмулл, соучредитель Pixar
- Джон Эдвард Уорнок, соучредитель компании Adobe
- Джеймс Кларк, основатель Silicon Graphics

Метод тонирования Гуро



Модель Сильвия Гуро (жена) - фото в Музее компьютерных наук в Маунтин-Вью.

В 1971 году Гуро создал представление человеческого лица в каркасной модели, а также применил свой шейдер для создания знаменитых изображений человеческого лица, демонстрирующих эффект его затенения.

Анри Гуро 1944 (82 года)

Французский специалист по информатике

Изобретатель затенения Гуро

Внучатый племянник генерала Анри Гуро

Буй Туонг Фонг 1942 – 1975



Опубликовал описание алгоритмов в своей докторской диссертации 1973 года и статье 1975 года

Сегодня модель Фонга используется во многих трехмерных движках



Сравнение закрасок:

«плоское», тонирование по Гуро, затенение по Фонгу

Иллюстрация: Лаборатория компьютерной графики при Нью-Йоркском технологическом институте

Эдвин Катмулл

31 марта 1945 г. (81 год)

- Его считают отцом компьютерной мультипликации
- Президент Walt Disney и Pixar
- Анимированная модель руки (1972)
- Z-buffer (1975)
- «Оскар» (1993, 1996, 2001)
- Премия Гильдии продюсеров США (2002)
- **Медаль Джона фон Неймана** (2006)
- Награда имени Гордона Сойера (2009)
- **Премия Тьюринга** (2020)



В 1976 году на экраны вышел триллер «Мир будущего» (Futureworld), ставший благодаря «руке Кэтмелла» первым, где использовалась компьютерная анимация

https://www.youtube.com/watch?v=naGntYNTSQM&ab_channel=AmpJr

Попытался
синхронизировать звук и
движение губ
компьютерной модели.
И это в 1974 году!

Фред Парк
13 мая, 1943
(81 лет)





Джеймс Кларк 23 марта 1944 года (возраст 82)

- основатель Silicon Graphics
- изобрел один из первых аппаратных ускорителей для рендеринга компьютерных изображений
- сыграл важную роль в разработке спецификации OpenGL



Джон Эдвард Уорнок 1940 г – 2023 г

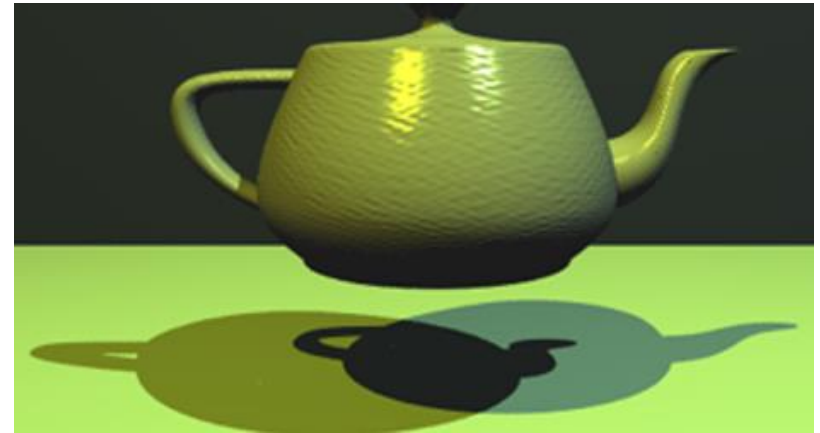
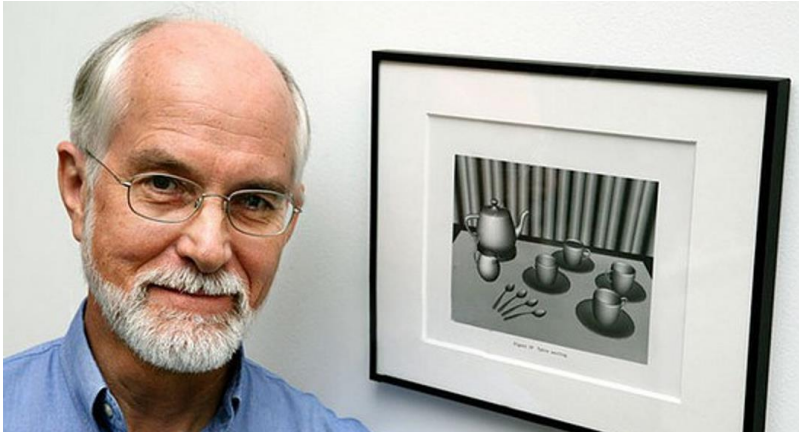
- соучредитель компании Adobe
- создатель PostScript
- создатель формата PDF
- алгоритм Уорнока: метод удаления невидимых поверхностей для 3D-графики

SIGGRAPH — 1974

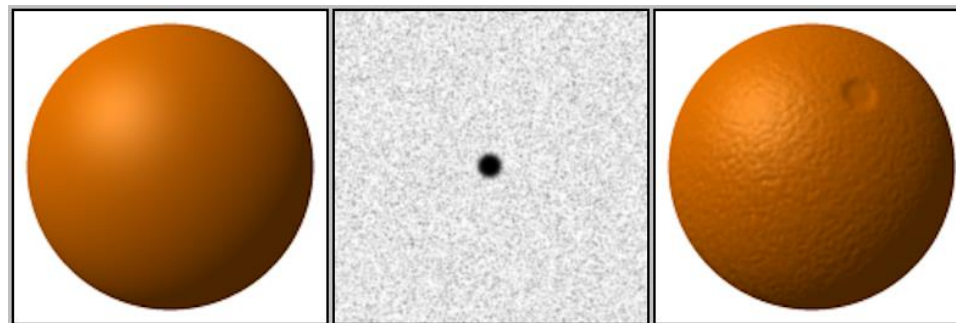
Летом 1974 года в Боулдере (шт. Колорадо) на базе Ассоциации по вычислительной технике США (Association for Computing Machinery, ACM) в рамках Специальной группы по компьютерной графике (Special Interest Group in Computer Graphics, SIGGRAPH) состоялась первая тематическая конференция.

На SIGGRAPH 1975 года проводилась демонстрация объекта, которому было суждено стать «иконой» компьютерной графики. Им оказался...

Чайник Юты Мартина Ньюелла



Джим Блинн 1949 г. (77 лет)



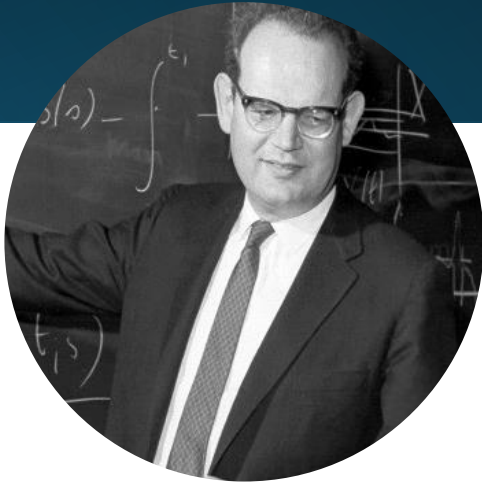
- **Bump mapping (1978):** Техника, позволяющая имитировать шероховатости и неровности поверхности без изменения её геометрии
- **Модель освещения Блинна–Фонга (1977):** Модификация модели освещения Фонга, которая сделала вычисления бликов более эффективными
- **Закон Блинна** Сформулировал эмпирический закон: время рендеринга остаётся постоянным



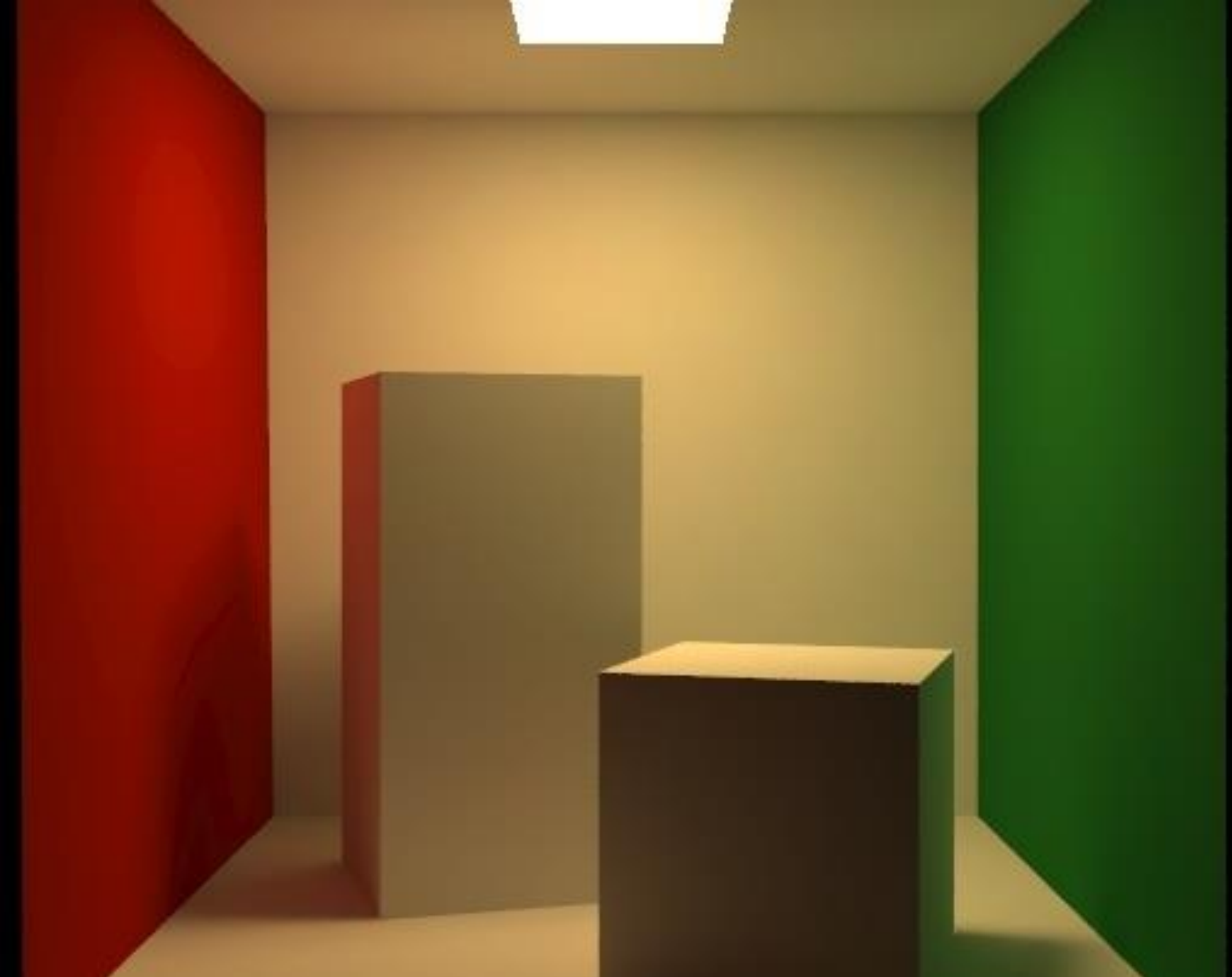
Группа Университета Юты

К 1978 году
фундаментальные методы
рендеринга и
визуализации, раскрытые в
докторских диссертациях,
включали алгоритм
Уорнока, затенение Гуро,
сплайн Кэтмулла-Рома и
модель отражения Блинна-
Фонга. Atari, Silicon Graphics,
Adobe, Pixar и Netscape —
это компании, которые
основали выпускники
Университета Юта

Бенуа Мандельброт (1924-2010) из Исследовательского центра IBM



«Фрактальные объекты: форма, случайность и размерность» (Les objets fractals: Forme, hasard et dimension),
изданная в 1977 году



1984

Отдел графики
Корнельского университета
занимался разработкой
новых алгоритмов
трассировки света

Работа «Моделирование
взаимодействия света с
диффузными
поверхностями» —
«глобальная освещенность»
.

1986 - 2000 гг

Уравнение рендеринга (1986)

Трассировка путей (1986)

RenderMan (1988)

«Парк Юрского периода» (1993) — как демонстрация возможностей

«История игрушек» (1995) — как веха

Программируемые шейдеры (конец 90-х) — задел на будущее

Сравнительная таблица

Критерий	«Парк Юрского периода» (1993)	«История игрушек» (1995)
Роль CGI	Спецэффекты внутри живого кино	Полностью CGI-фильм
Задача	Интеграция с реальностью	Создание целого мира
Технология	Рендеринг кожи, мышц, освещения	Полный пайплайн: модель → текстура → анимация → рендеринг
Значение	Доказал, что CGI может быть фотореалистичным	Доказал, что CGI может быть самостоятельным искусством

2000 – 2026 гг.

-  **Эпоха программируемой графики (2000-е — начало 2010-х)**
 - Появление программируемых шейдеров (2001)
 - Рост вычислительной мощности GPU
-  **Расцвет физически корректного рендеринга и визуальных эффектов (2000-е — 2020-е)**
 - Развитие PBR и глобального освещения
 - HDR image-based lighting (Оскар, 1998) — стал стандартом в кино
 - Реалистичные виртуальные персонажи
-  **Современный этап: ИИ, трассировка лучей и новые представления данных (2020-е — 2026)**
 - Аппаратно-ускоренная трассировка лучей → трассировка путей в реальном времени
 - ИИ и нейросетевые методы (с 2022)
 - Новые парадигмы: волновой подход вместо пиксельного, вычисление winding number (SIGGRAPH 2026)

Вот что мы будем изучать пошагово

Вершины (3D)

Преобразования (Model/View/Projection)

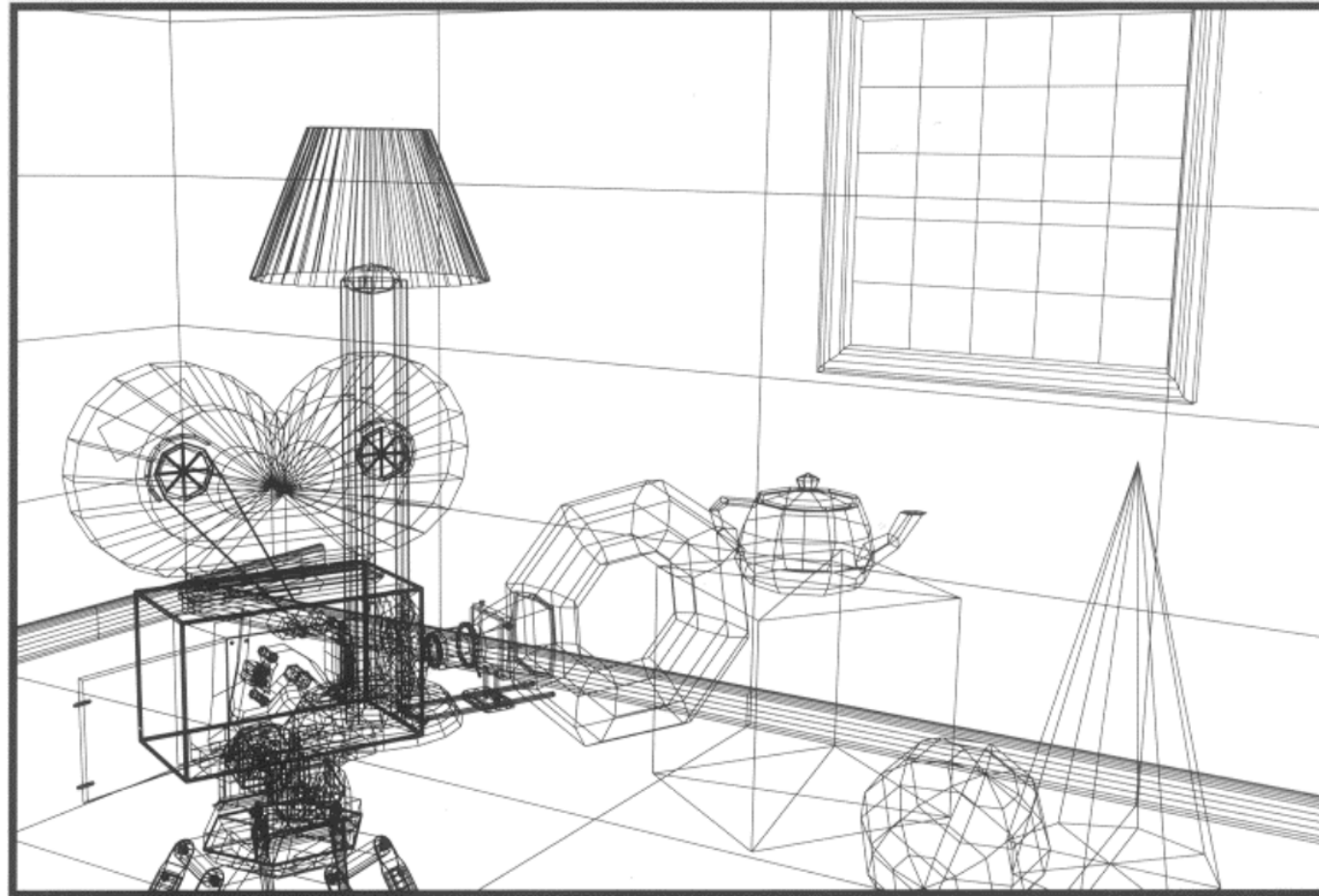
Растеризация (В пиксели)

Фрагментный шейдер (Цвет)

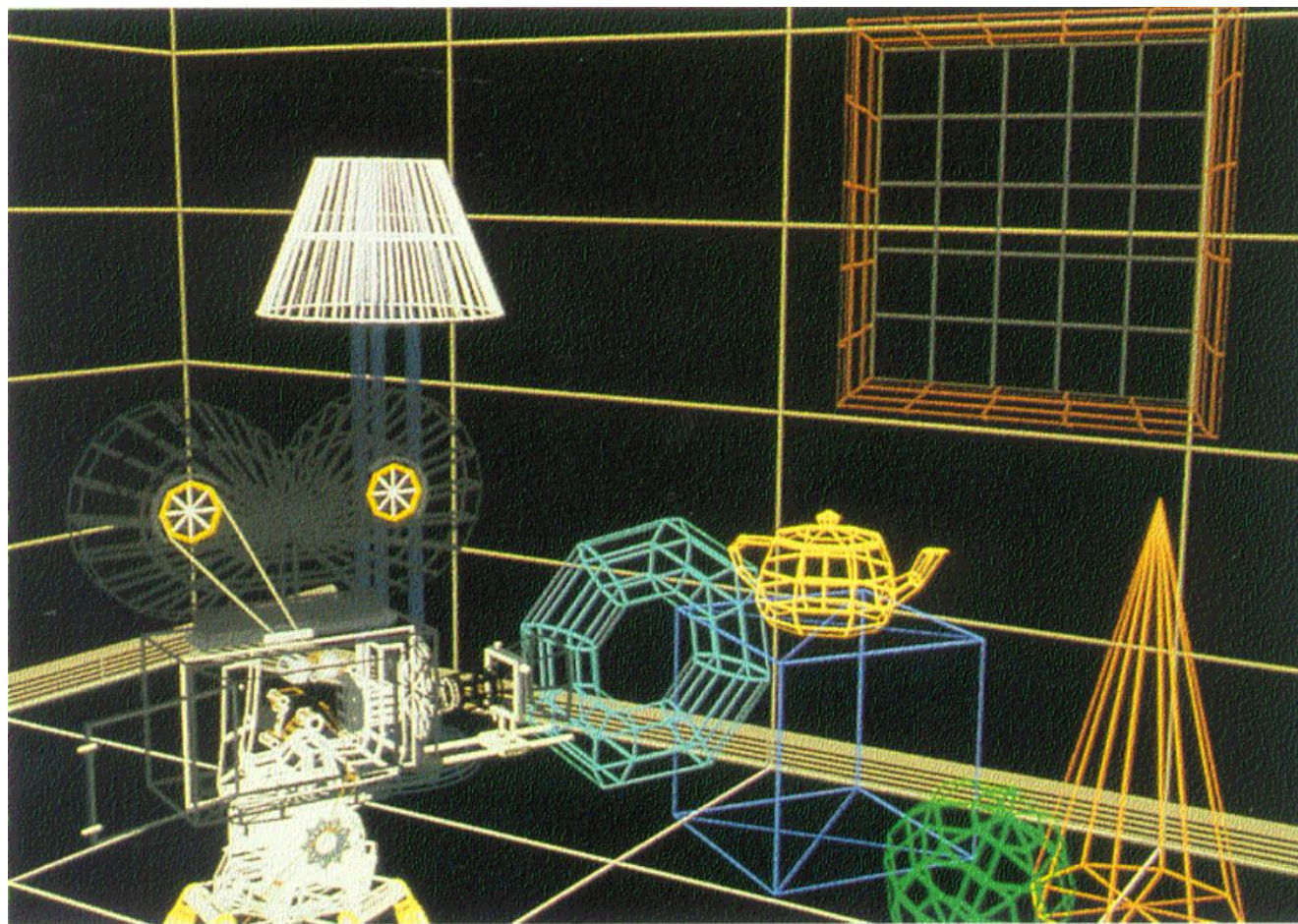
Пост-обработка

Буфер кадра

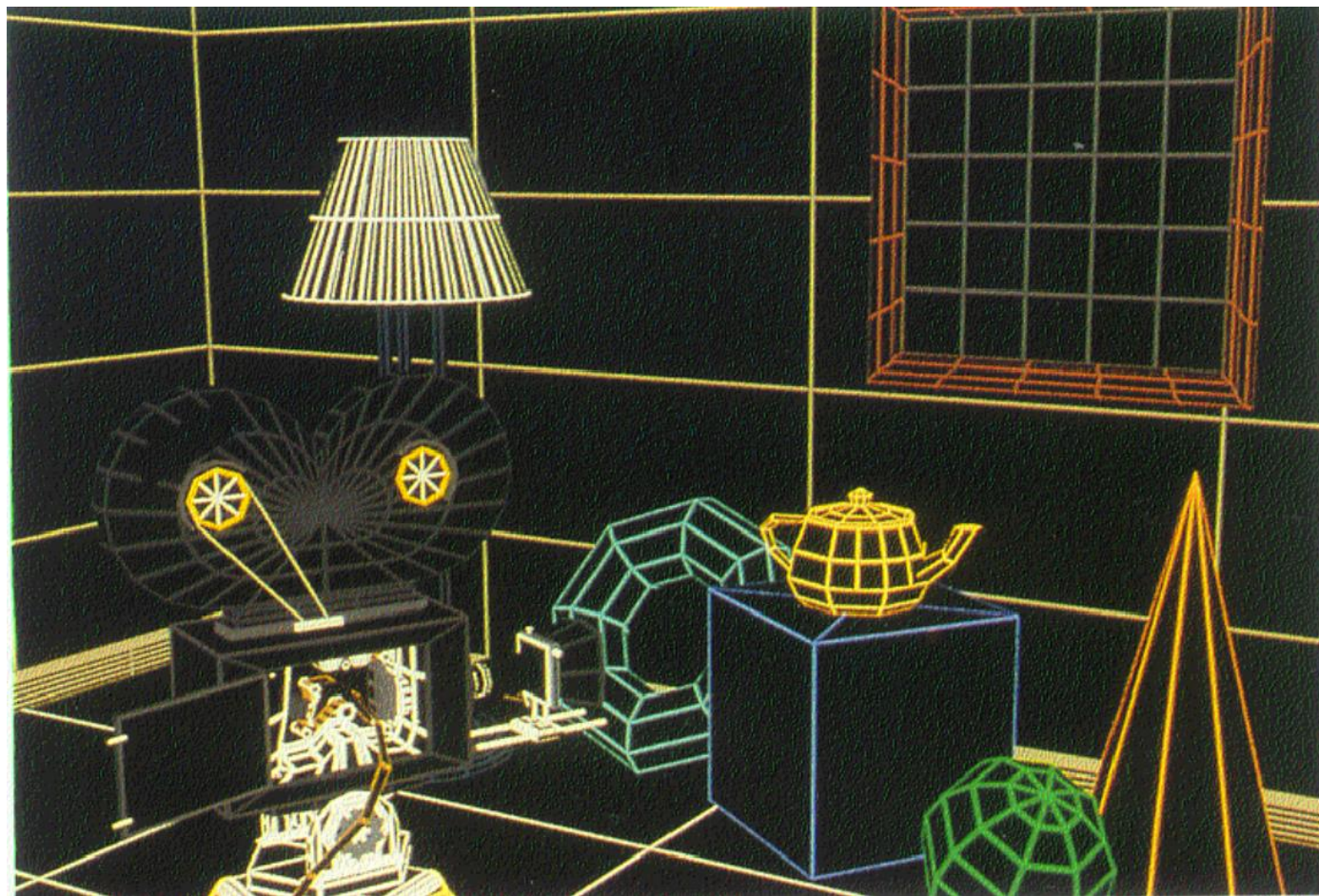
Каркасная модель (перспективная проекция)



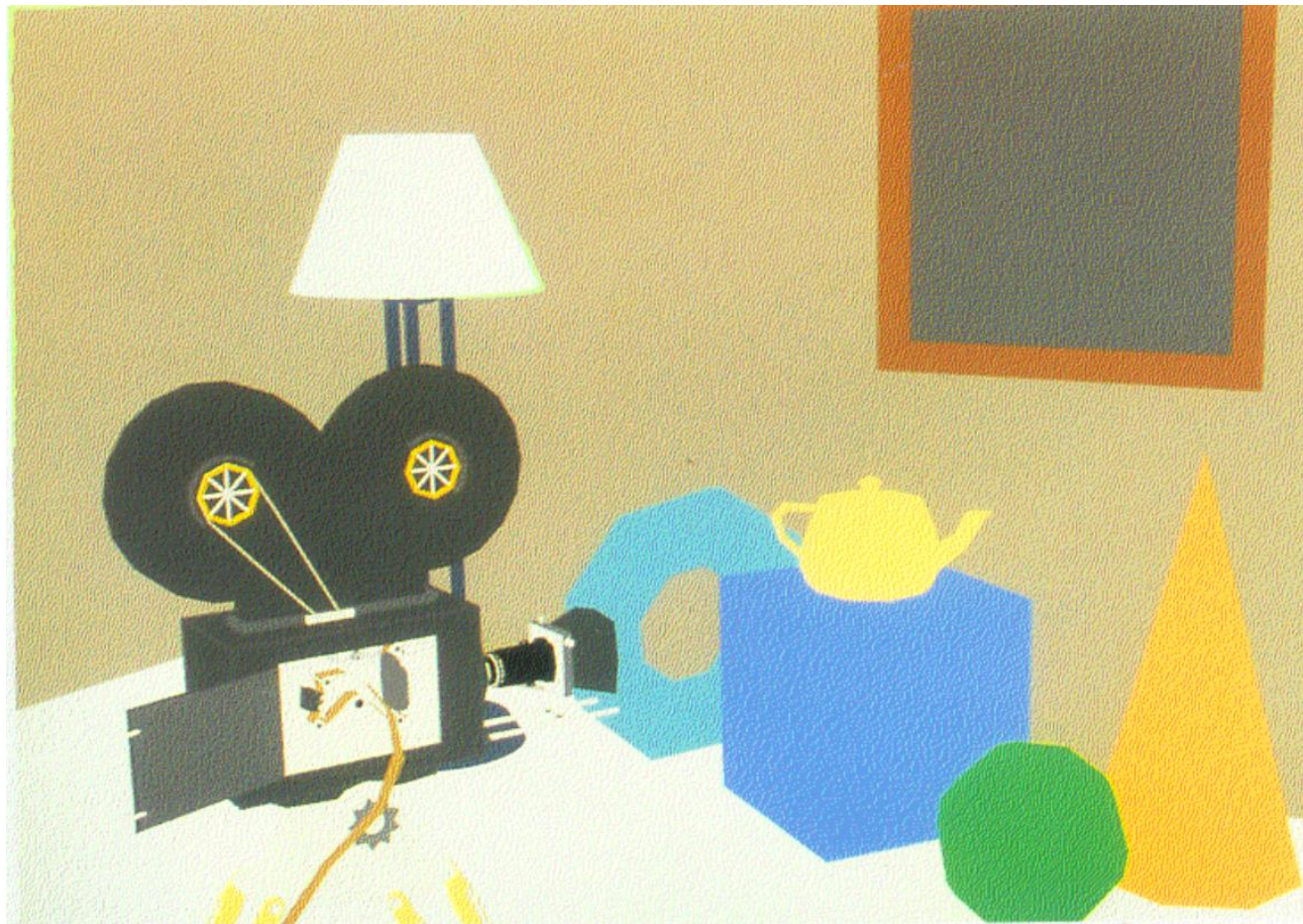
Цветные линии



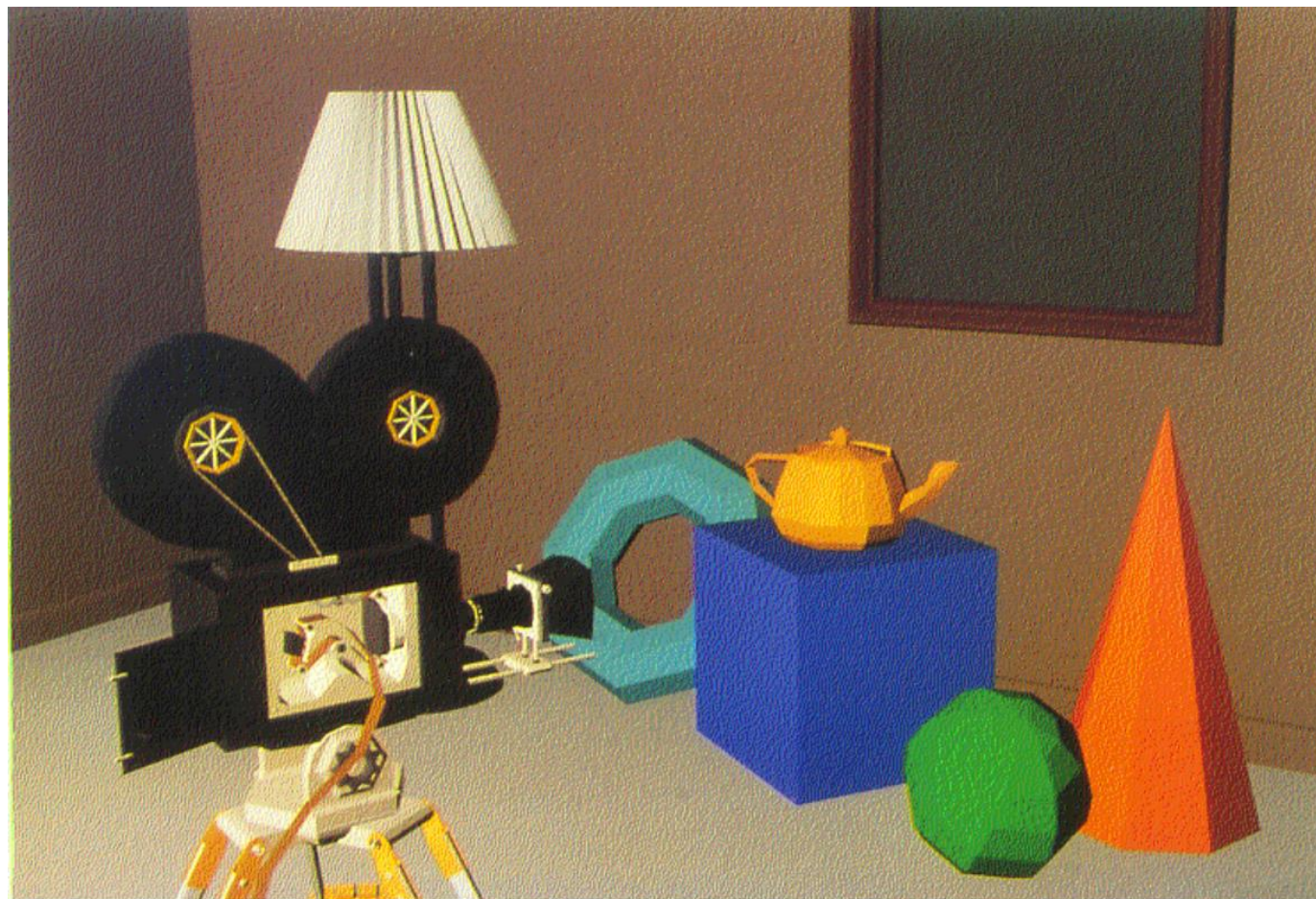
Удаление невидимых линий



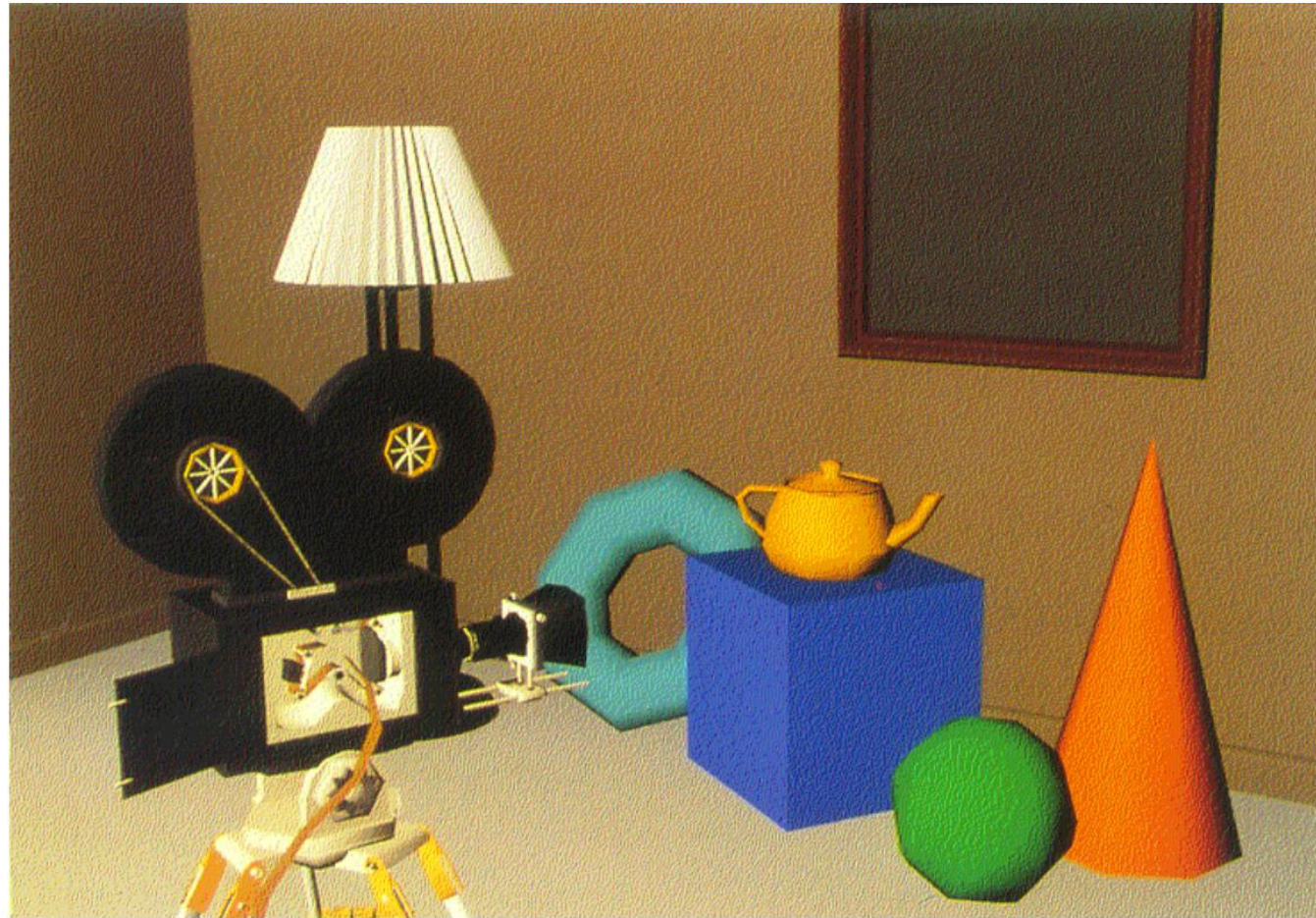
Определение видимых поверхностей (рассеянный «ambient» свет)



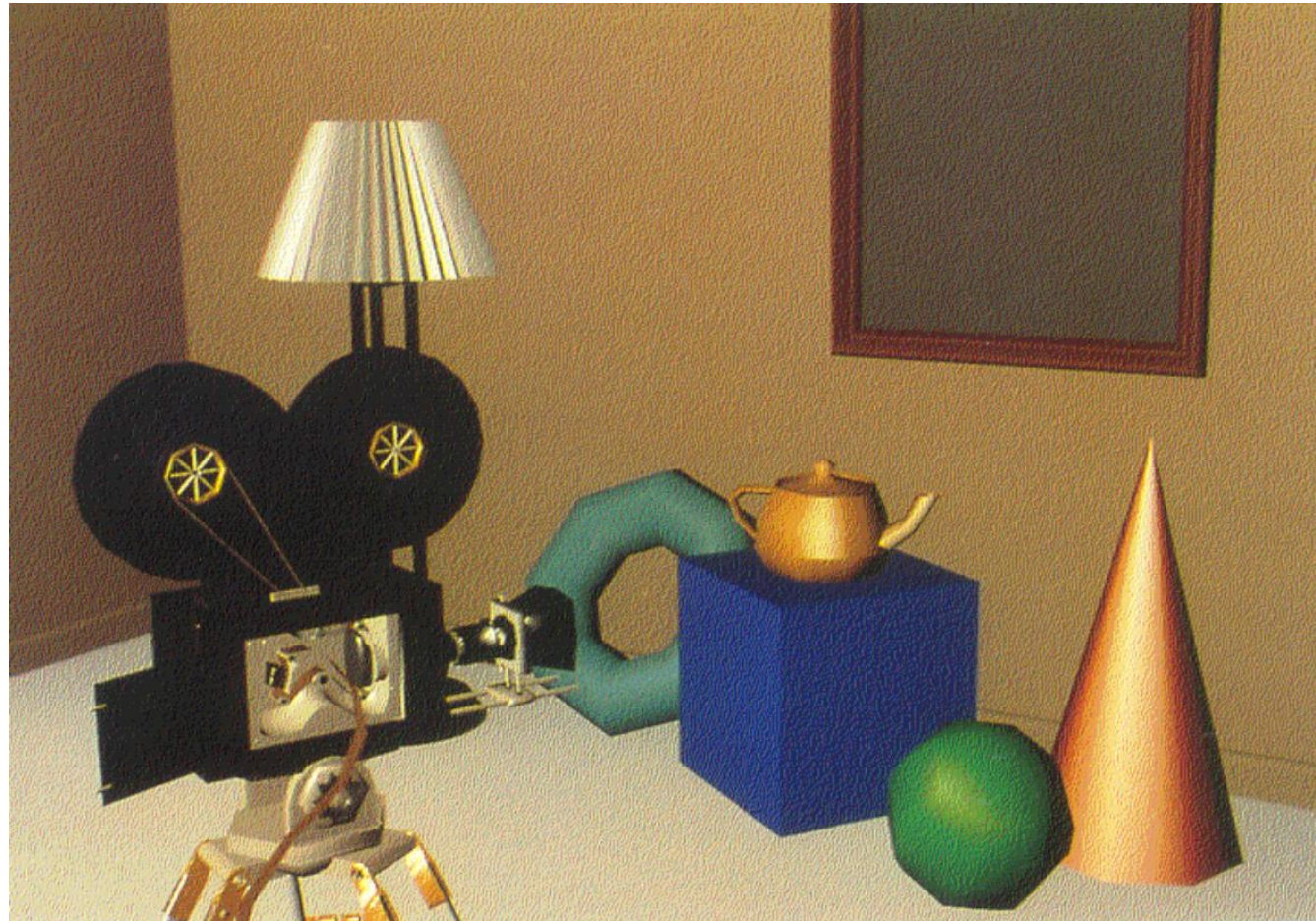
Закраска индивидуальных полигонов (плоская «flat» закраска)



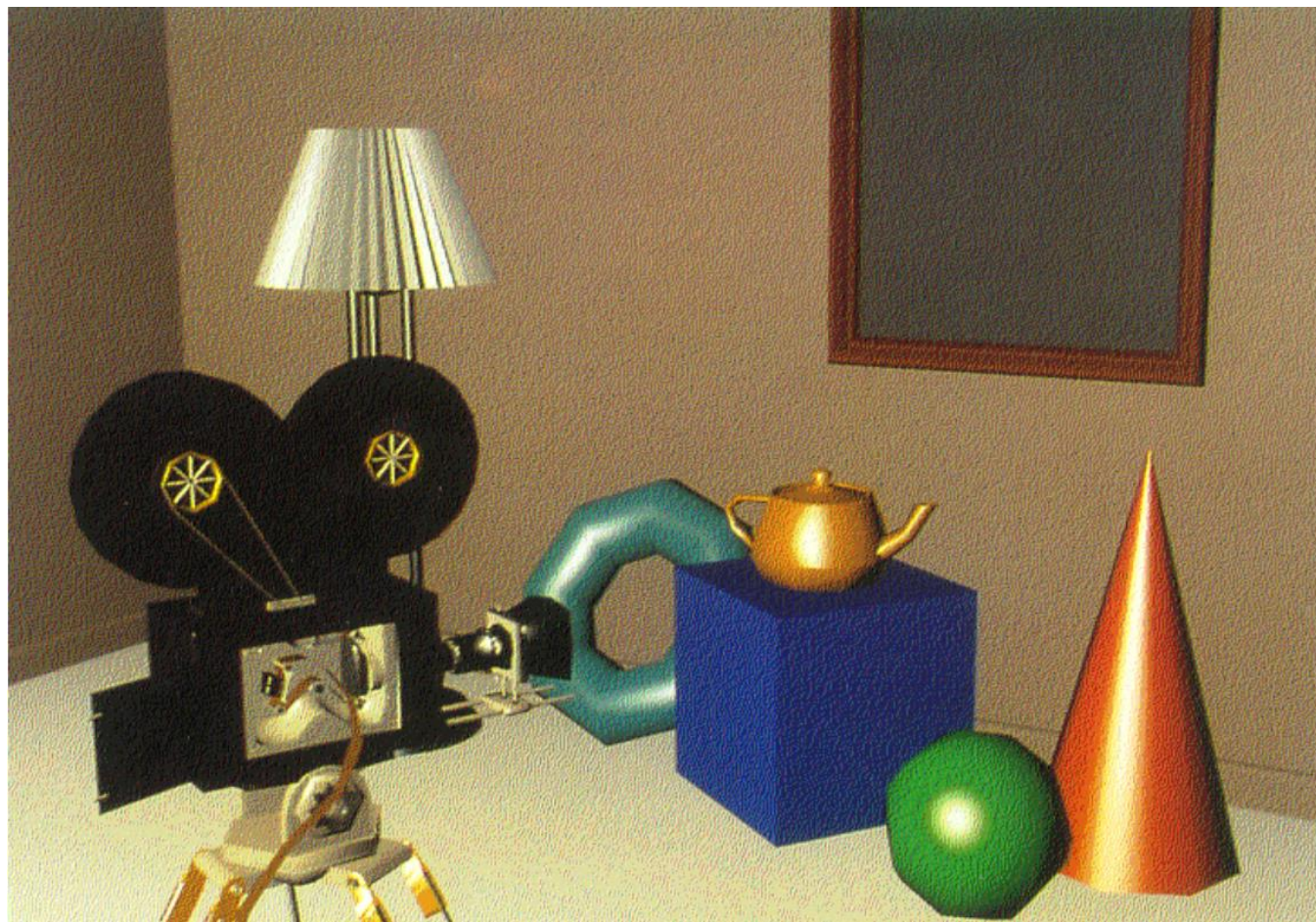
Закраска Гуро (диффузное отражение)



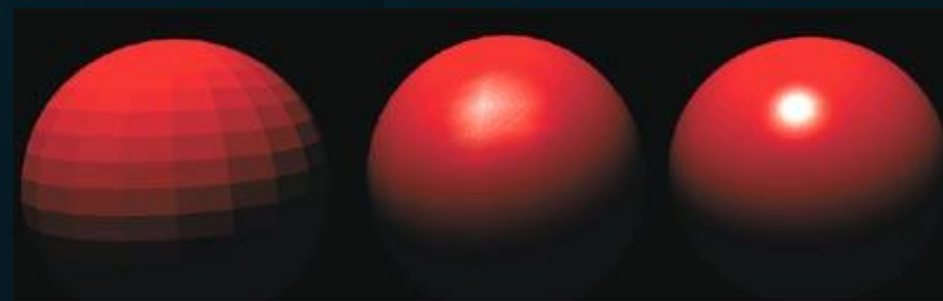
Закраска Гуро (зеркальное «sresular» отражение)



Закраска Фонга (зеркальное отражение)



Затенение



1. Плоское 2. По Гуро 3. По Фонгу

Криволинейные поверхности (зеркальное отражение)



Текстуры и тени (отражение в зеркале)



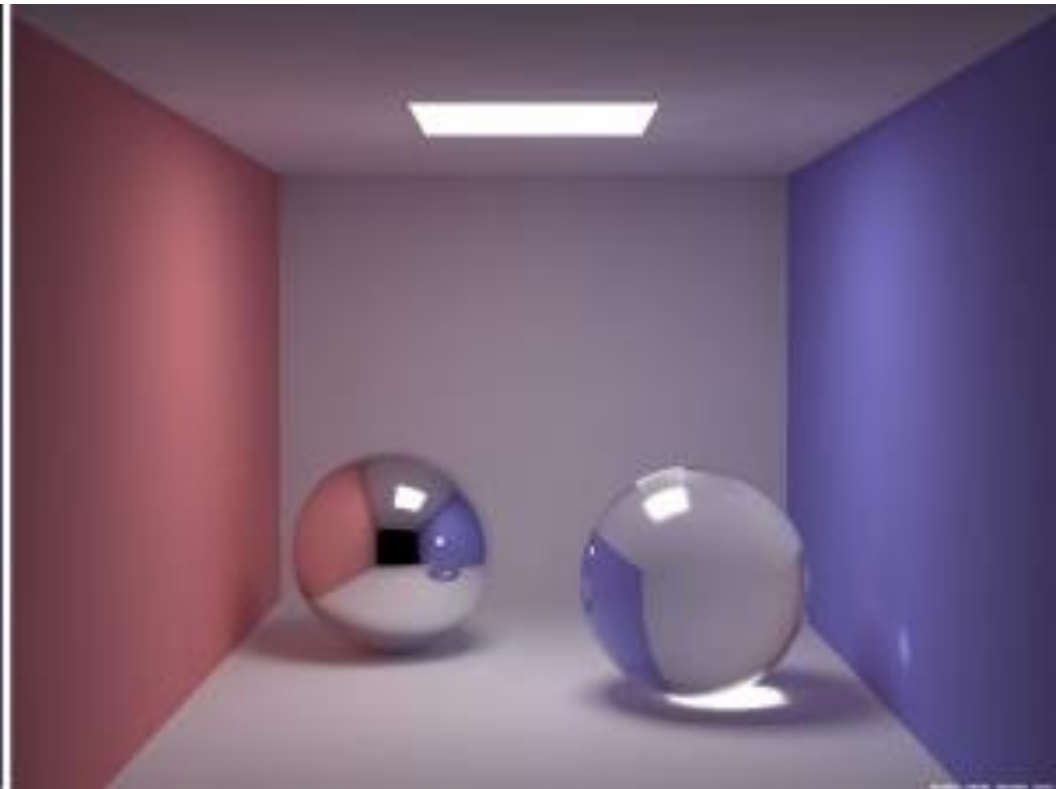
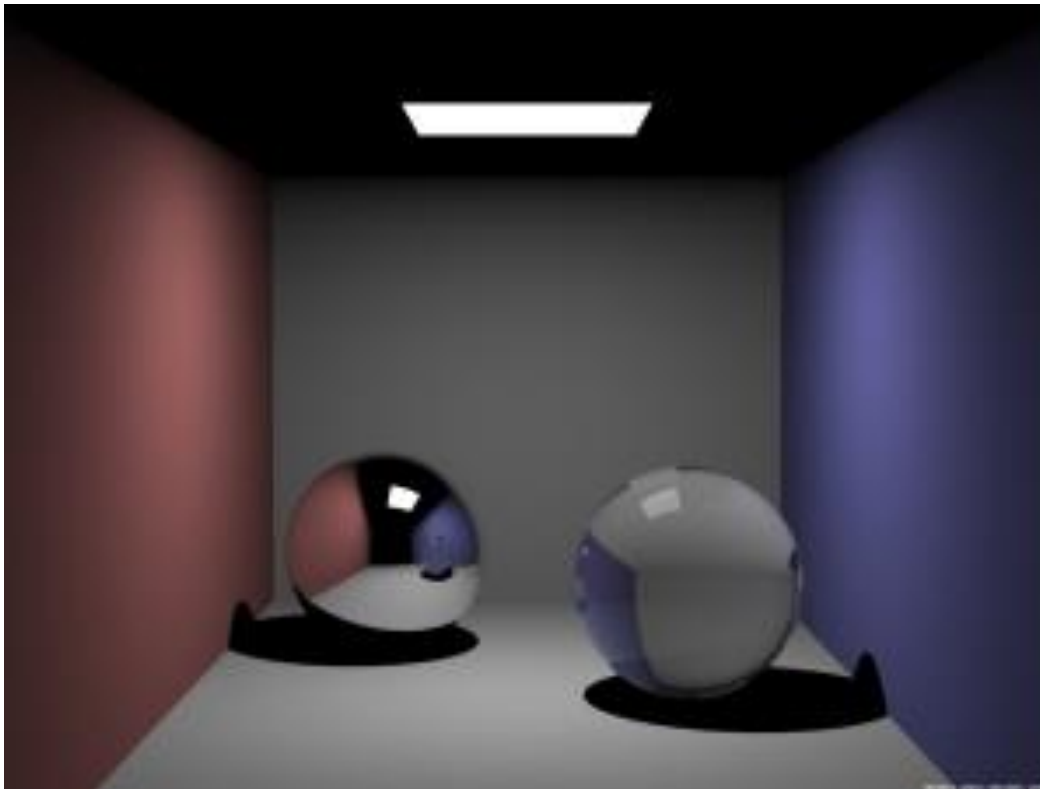
Real Time vs Real Image

Быстро (Часы/дни на один кадр)

Имитирует реальность

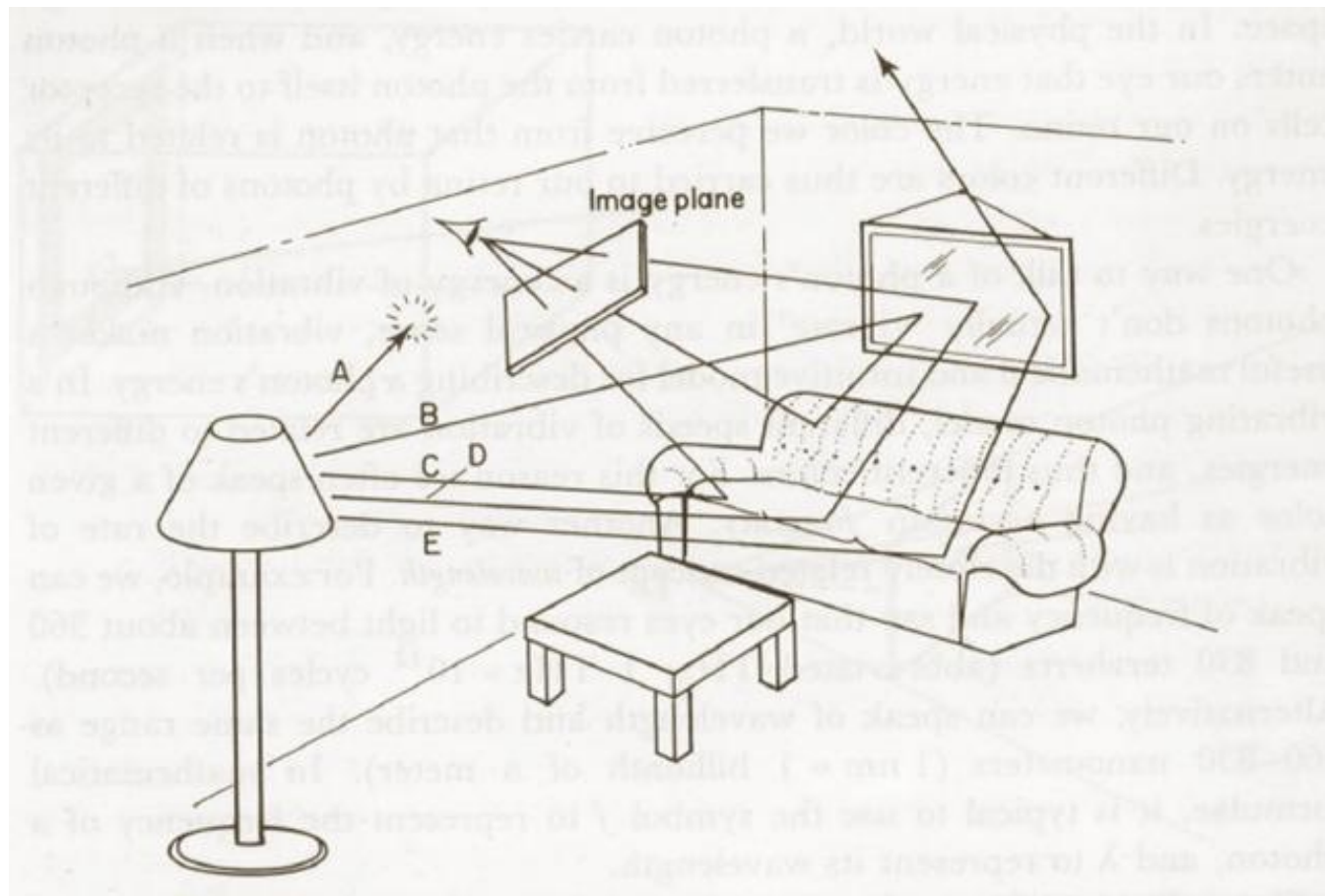
Медленно (Часы/дни на один кадр)

Очень похоже на реальность



Критерий	Real-Time Graphics	Real Image / Offline
Время кадра	≤ 16 мс (60 FPS)	Минуты—часы на кадр
Освещение	Приближения + запечённые карты	Физический Path Tracing (точный свет)
Геометрия и детали	Упрощена + LOD / сжатие	Максимальная точность (subdiv, displacement)
Качество картинки	TAA/DLSS (апскейл, есть артефакты)	64–4096 сэмплов/пиксель (идеальная чистота)
Главное назначение	Интерактивность (игры, VR, симуляторы)	Фотореализм (кино, архитектура, реклама)

Сцена для объяснения действия алгоритма Ray-Tracing



Ray-casting - Arthur Appel - 1968 г

Ray-tracing - Turner Whitted - 1979 г

Классический Ray Tracing и алгоритм Radiosity



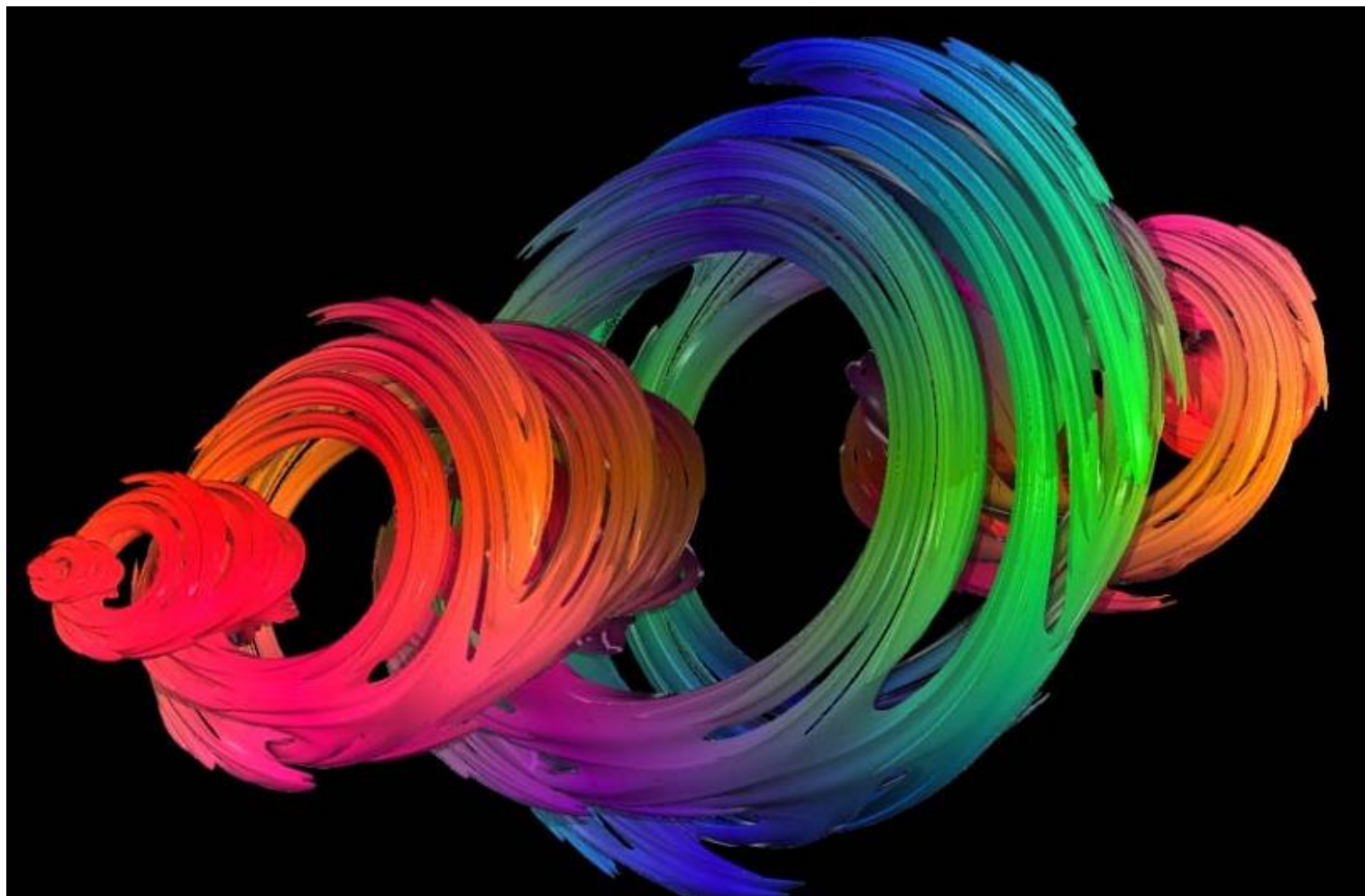
Ray-tracing - Turner Whitted - 1979 г



Goral, Torrance, Greenberg и Battaile в 1984 году

Визуализация неявно заданных поверхностей на
основе трассировки лучей (Ray Tracing)

3D фрактал Джулиа с
теньями





SIGGRAPH 2021
VIRTUAL 9-13 AUGUST

[ABOUT THE
CONFERENCE](#)

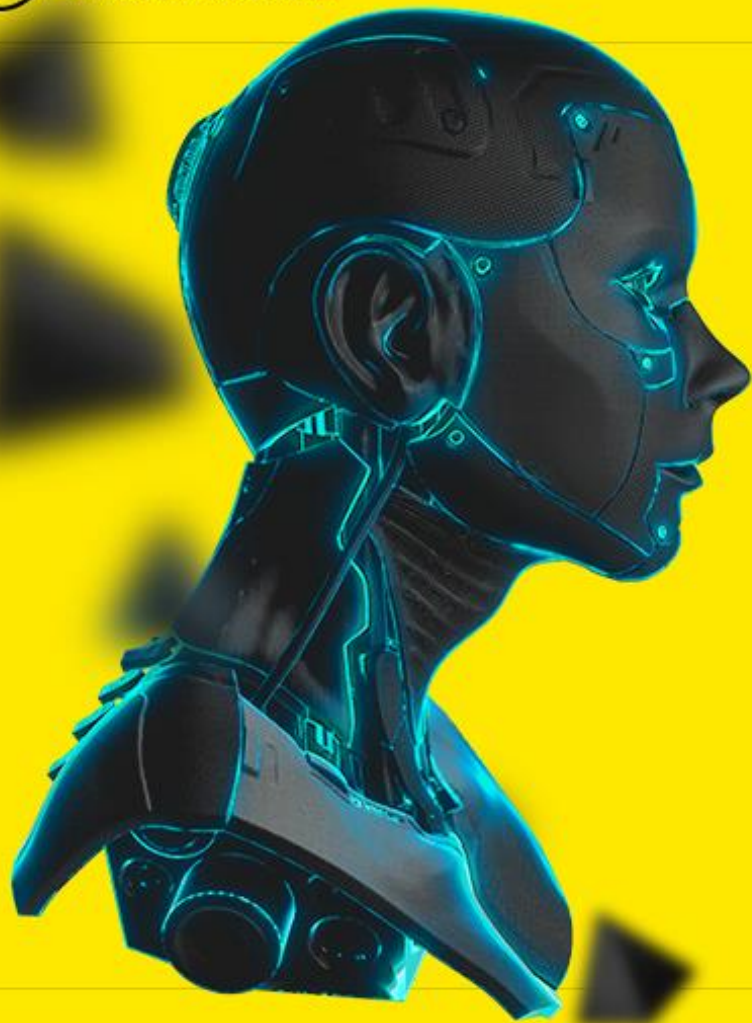
[PROGRAMS
& EVENTS](#)

[THE
EXHIBITION](#)

[PLAN TO
ATTEND](#)

[VOLUNTEER
WITH US](#)

[REGISTER
TODAY](#)



WELCOME TO SIGGRAPH 2021

→ **THE PREMIER CONFERENCE
& EXHIBITION IN COMPUTER
GRAPHICS & INTERACTIVE
TECHNIQUES**

FEATURED SPEAKERS

Industry experts take the stage at SIGGRAPH 2021.

SEE ALL SPEAKERS



FARI



HANY FARID

DARI



KATE DARLING

SANDERSON



GRANT SANDERSON

AMY HENNIG



AMY HENNIG

SERGIO PABLOS



SERGIO PABLOS

ED CATMULL



ED CATMULL

PAT HANRAHAN



PAT HANRAHAN

ERIC IVERSON



JIM JEFFERS

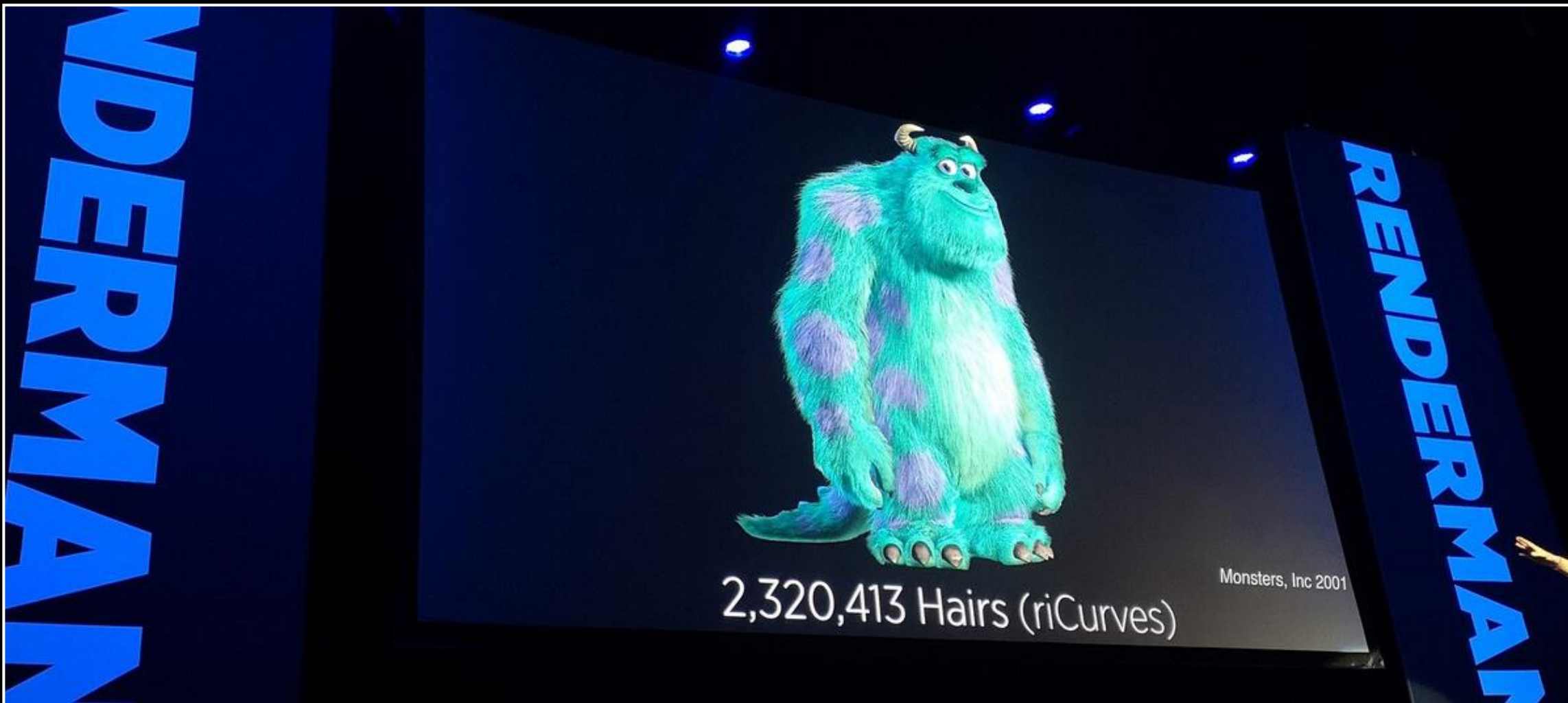


RICHARD KERF



TIMONI WES





В первой Корпорации Монстров у Салливана было 2 миллиона волос(кривых)



В четвертой Истории Игрушек счет пошел на миллиарды (листьев)



1,026,224,306,685 Pine Needles

И даже на триллионы



Strand-based Hair Solution | Unity



Смотреть ...



Поделиться



ПОКАЗАТЬ ДРУГИЕ ВИДЕО

Смотреть (k)



0:49 / 0:55

<https://www.youtube.com/watch?v=Lu7zyqHMB8Q>



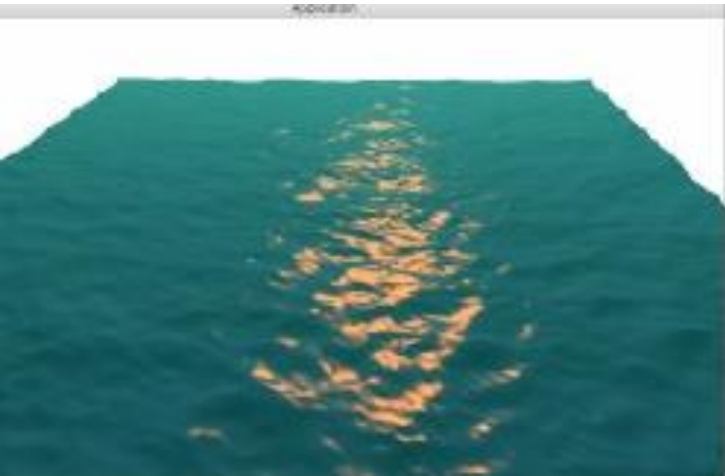
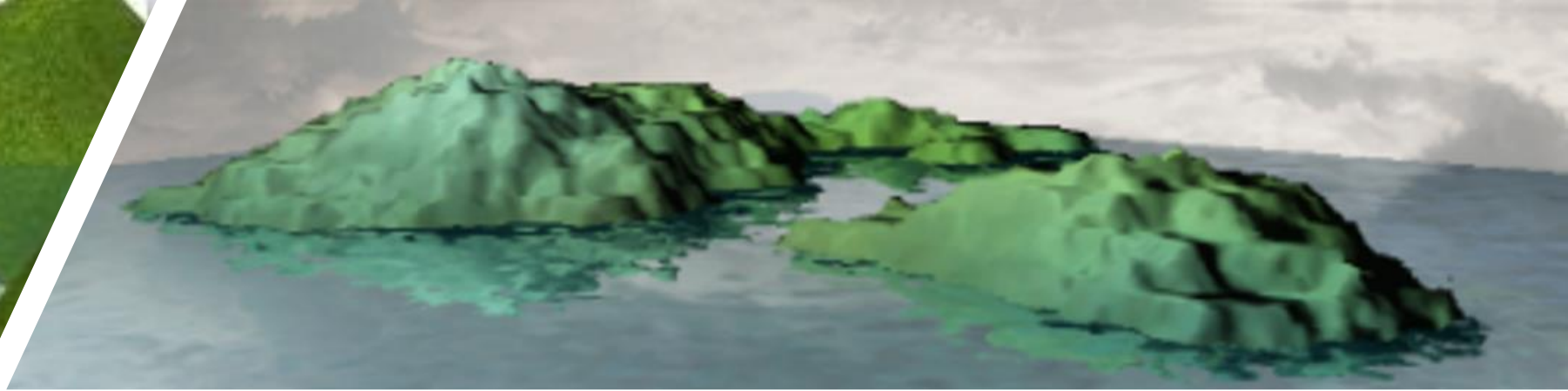
YouTube

58



Визуализация водных поверхностей на основе растеризации с картами нормалей



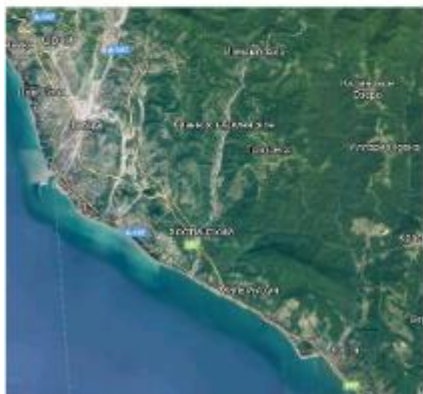
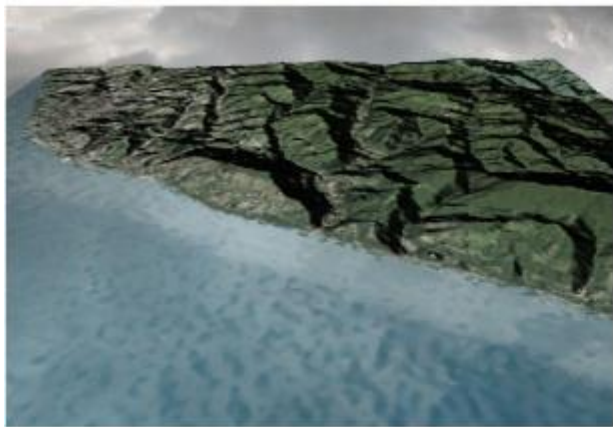


Визуализация водной поверхности

Авторы: Ковтун Богдан и Поповская Влада



Генерация ландшафта по реальным картам



Автор: Поповская Влада

Автор: Нечушкин Дмитрий

Основные принципы



Learning instead of Teaching (Не учить, а учиться)



Learning by Doing (Учиться, делая)

Основная литература

Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы компьютерной графики. М.: Машиностроение, 1980.

Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Динамика, реалистические изображения. /М.: Диалог-МИФИ, 1995.

Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели. /М.: Диалог-МИФИ, 2000.

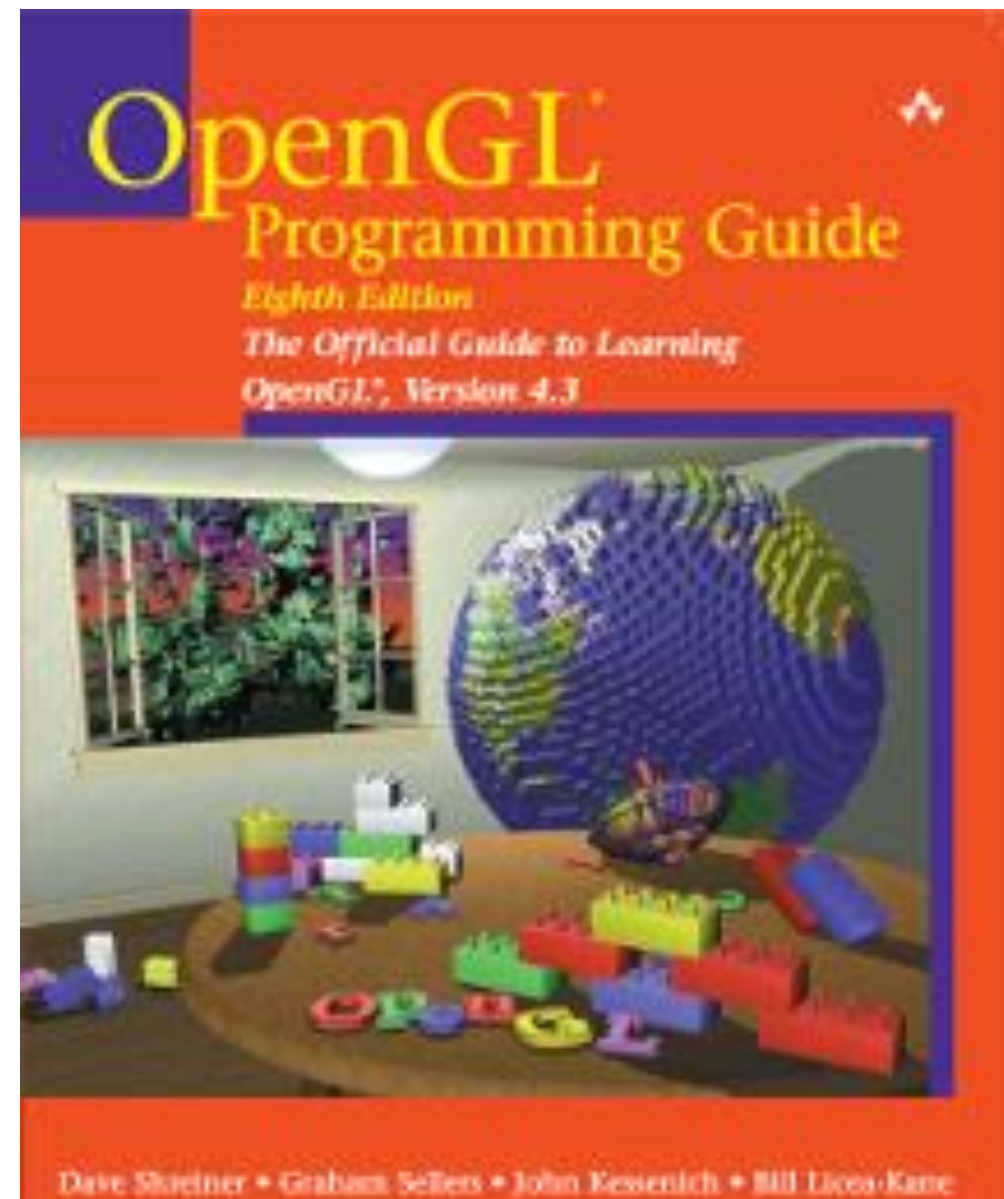
Майкл Ласло. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. /М.: БИНОМ, 1997.

FletcherDunn, IanParberry. 3D Math Primer for Graphics and Game Development. 2011

PeterShirley, SteveMarschner. Fundamentals of Computer Graphics. 2009

STEVENJ.JANKE. MATHEMATICAL STRUCTURES FOR COMPUTER GRAPHICS. 2015

8-е издание OpenGL Programming Guide



Дополнительная литература

Миллер. DirectX 9 с управляемым кодом: Москв, Изд. дом «КомБук», 2005. 400 с

Дональд Херн, М. Паулин Бейкер. Компьютерная графика и стандарт OpenGL. //Спб.: Вильямс, 2004

Френсис Хилл. OpenGL. Программирование компьютерной графики. /Спб.: Питер, 2002

Коичи Мацура, Роджер Ли. WebGL: программирование трёхмерной графики. //М.: ДМК,2015

Frank Klawonn. Introduction to Computer Graphics. 2005

Дэвид Вольф. OpenGL 4. Язык шейдеров. Книга рецептов. Москв, ДМК Пресс, 2015. 368 с



Конференции

- [конференция Siggraph](#), проводится в США
- [конференции Eurographics](#), проводятся ассоциацией [Eurographics](#) ежегодно в странах Европы
- [конференция Графикон](#), проводится в России
- [CG-событие](#), проводится в России
- [CG Wave 2008](#), CG Wave, проводится в России