

Модуль № 1. «Створення фотореалістичних тривимірних зображень та технології 3D графіки»

Лекція 1.1. Основні поняття 3D технологій. Представлення тривимірних об'єктів. Побудова тривимірних фотореалістичних зображень.

Поняття "тривимірна графіка" має на увазі не способи побудови тривимірних об'єктів, а їх зображення на площині.

Для зображення тривимірних об'єктів на екрані монітора потрібно проведення серії процесів (звичайно називаних конвеєром) з наступною трансляцією результату в двовимірний вид. Спочатку, об'єкт представляється у вигляді набору точок, або координат, в тривимірному просторі. Тривимірна система координат визначається трьома осями: горизонтальної, вертикальної і глибини, звичайно називаних, відповідно осями x, y і z. Об'єктом може бути будинок, людина, машина, чи літак цілий 3D світ і координати визначають положення вершин (вузлових точок), з яких складається об'єкт, у просторі.

Процес створення тривимірного проекту ділиться на декілька обов'язкових і послідовних етапів. Вони однакові, незалежно від того, в якому 3D-редакторі виконується проект і який це проект.

Тривимірний проект часто називають сценою.

Рендеринг (rendering - «візуалізація») - процес отримання зображення за моделлю за допомогою комп'ютерної програми, тобто створення плоского зображення (картинки) на растрі за розробленою 3D-сценою.

Шейдер (Shader) - це програма для одного із ступенів графічного конвеєра, що використовується в тривимірній графіці для визначення остаточних параметрів об'єкта або зображення.

Вершинний шейдер оперує даними, зіставленими з вершинами багатогранників.

Геометричний шейдер, на відміну від вершинного, здатний обробити не тільки одну вершину, але і цілий примітив.

Для опису форми поверхонь можуть використовуватися

Аналітична модель поверхні

Векторна полігональна модель

Воксельна модель

Рівномірна сітка

Нерівномірна сітка. Ізолінії

Аналітичною моделлю називається опис поверхні математичними формулами:

$z=f(x,y)$ - опис за допомогою функції,

$F(x,y,z)=0$ - опис за допомогою неявного рівняння.

Найчастіше використовується параметрична форма опису поверхні:

$$\begin{cases} x = F_x(s,t) \\ y = F_y(s,t) \\ z = F_z(s,t) \end{cases}$$

Перевага параметричної форми полягає в легкості опису поверхонь, які відповідають неоднозначним функціям, та замкнутих поверхонь.

Параметричний опис можна задати таким чином, що формула не буде істотно змінюватися (ускладнюватися) при поворотах поверхні, та її масштабуванні.

Переваги

- легкість розрахунку координат кожної точки поверхні, нормалі;
- невеликий обсяг даних для опису досить складних форм.

Недоліки

- складність формул опису з використанням функцій, які повільно обчислюються на комп'ютері, знижують швидкість виконання операцій відображення
- неможливість в більшості випадків застосувати цю форму опису безпосередньо для зображення поверхні - поверхня відображається як багатогранник, координати вершин і граней якого розраховуються в

процесі відображення, що зменшує швидкість порівняно з полігональною моделлю опису.

Векторна полігональна модель використовуються наступні елементи:

- вершини,
- відрізки прямих (вектори),
- полілінії,
- полігони,
- полігональні поверхні.

Переваги

- зручність масштабування об'єктів. При збільшенні або зменшенні об'єкти виглядають більш якісно, ніж при растрових моделях опису. Діапазон масштабування визначається точністю апроксимації і розрядністю чисел для подання координат вершин;
- невеликий обсяг даних для опису простих поверхонь, які адекватно апроксимуються плоскими гранями;
- необхідність обчислювати тільки координати вершин при перетвореннях систем координат або переміщенні об'єктів;
- апаратна підтримка багатьох операцій в сучасних графічних відеосистемах, яка обумовлює досить високу швидкість для анімації.

Недоліки

- складність алгоритмів візуалізації для створення реалістичних зображень; складність алгоритмів виконання топологічних операцій, таких, наприклад, як розрізи;
- апроксимація плоскими гранями приводить до похибки моделювання. При моделюванні поверхонь, які мають складну фрактальну форму, зазвичай неможливо збільшувати число граней через обмеження за швидкодією та обсягом пам'яті комп'ютера.

Воксельна модель

Воксельна модель - це тривимірний растр. Подібно до того, як пікселі розташовуються на площині двовимірного зображення, воксели утворюють тривимірні об'єкти в певному об'ємі.

Воксел - це елемент об'єму (voxel - volume element).

Переваги

- простота: при описі складних об'єктів і сцен; при відображенні об'ємних сцен; при виконанні топологічних операцій над окремими об'єктами і сценою в цілому.

Недоліки

- велику кількість інформації, необхідної для подання об'ємних даних;
- значні витрати пам'яті обмежують роздільну здатність, точність моделювання; велика кількість вокселів обумовлює малу швидкість створення зображень об'ємних сцен;
- як і для будь-якого растру, виникають проблеми при збільшенні або зменшенні зображення.

Принципи фотореалізму

Існує безліч чинників, що впливають на достовірність зображення, проте всі вони відносяться до однієї з десяти категорій, які я називаю принципами тривимірного фотореалізму. При дотриманні перерахованих нижче принципів комп'ютерна картинка буде майже невідмітна від фотографії. Пропоновані правила допоможуть вам моделювати як промислові, так і природні об'єкти.

Отже, ось ці принципи:

1. Безлад і хаос.
2. Характери персонажів і очікування глядачів.
3. Правдоподібність зображення.
4. Текстура поверхні.
5. Дзеркальне віддзеркалення.
6. Пил, грязь і гнилизна.
7. Тріщини, діри і щілини.
8. Закруглені краї.

9. Товщина матеріалу об'єкту.

10. Розсіяне світло.

Безлад і хаос

Процес фотореалістичного моделювання не зводиться всього лише до накладення на об'єкт «натуральних» текстур. Достовірність зображення визначається також і способом побудови сцени.

Хаос - найбільш очевидна властивість навколишнього нас світу. Загальним недоліком тривимірних зображень, що імітують природу, є відсутність деякої неупорядкованості в розташуванні предметів.

Характери персонажів і очікування глядачів

Будь-яка істота, будь то людина, ссавець, комаха або той же міфічний гоблін, володіє своїм характером, звичками, манерами. І краще всього про це «говорять» предмети, серед яких живе персонаж. Ступінь і способи впливу героя на навколишній світ різні.

Стереотипи і творчість

Створюючи персонажів сцени, важливо враховувати очікування глядачів. Людина звиклася мислити стереотипами. Ми можемо по-різному відноситися до цього факту, але він, проте, відмінно допомагає при розробці фотореалістичних моделей. Стереотипи не обмежують творчість, вони просто указують, як зробити твір правдоподібним.

Звичайно, особливість сцени визначається не лише природними об'єктами, але і персонажами. У такому разі доводиться показувати, який відбиток індивідуальності героя накладає на навколишні предмети.

Відповідність очікуванням глядача

Звичайно, глядачі не завжди є експертами по моделюванню природних об'єктів, але всі вони мають певне уявлення про те, що ви збираєтеся показати.

Правдоподібність зображення

Глядач повинен бачити щось подібне не один раз, щоб йому від чого відштовхуватиметься при оцінці фотореалістичності сцени. При розробці фотореалістичної графіки треба звернути особливу увагу на процес моделювання об'єкту і створення поверхонь.

Необхідно вибрати об'єкти, що виконують функцію якірних об'єктів - миттєво впізнанній деталі реального миру. Якірним (у іншій термінології базовим) об'єкт називають тому, що на нім тримається достовірність всієї сцени. Його достовірність компенсує можливий недолік реалістичності інших деталей.

Текстура поверхні

Всі поверхні об'єктів навколишнього нас світу володіють деякою текстурою. Не плутайте поняття «текстура» з терміном, широко вживаним в тривимірному моделюванні. Текстура - це не забарвлення об'єкту.

Дзеркальне віддзеркалення

Дзеркальним називається таке віддзеркалення світла поверхнею об'єкту, при якому кут віддзеркалення променя дорівнює куту падіння. Ми бачимо яскраву пляму, завдяки чому можемо зрительно визначити, наскільки покриття предмету гладке і тверде. Дзеркальне віддзеркалення - найважливіший аспект тривимірного фотореалізму. Воно необхідне для імітації основних властивостей поверхні. Без дзеркального віддзеркалення поверхня об'єкту покажеться тьмяною, неконтрастною і матовою.

Пил, грязь і гнилизна

Пил, грязь і гнилизна є дуже важливими характеристиками поверхні об'єкту, які зазвичай зв'язуються з його віком. В реальному світі дуже мало абсолютно чистих поверхонь.

Тріщини, діри і щілини

Ніщо не додає моделі такий неприродний вигляд, як поверхня, позбавлена всяких дефектів, особливо якщо це об'єкт природного походження. Жоден предмет в природі не буває ідеально гладким. Всі вони мають різні нерівності, починаючи від дрібних пір і закінчуючи очевиднішими пошкодженнями - щілинами і тріщинами.

Закруглені краї

Необхідно, щоб природні об'єкти мали згладжені краї, але куди важливіше не забувати про даний принцип, коли ви показуєте предмети, що створені людиною або якимись іншими істотами.

Товщина матеріалу об'єкту

Одній з моїх основних вад при створенні тривимірних моделей є те, що в них не показана товщина матеріалу. Фотореалістичним зображенням може вважатися тільки те зображення, яке створює відчуття глибини простору.

Розсіяне світло

Імітація розсіяного світла (або дифузного віддзеркалення) - найважливіший з десяти принципів фотореалізму. Просто кажучи, це відбите світло, розподілене між об'єктами. Майже всі предмети і речовини навколишнього нас світу в тому або іншому ступені відображають світло. Вода, наприклад, володіє цією здатністю в найбільшій мірі.

Лекція 1.2. Візуалізація тривимірних зображень.

Проецювання - це перетворення, що ставить у відповідність точкам тривимірного простору точки на деякій площині, яка називається картинною.

В комп'ютерній графіці використовуються два основних види проєцювання : паралельне і перспективне.

Спосіб проєцювання 3D-сцени на проєкційну площину камери (дисплея, аркуша паперу тощо) можна задати матрицею проєкції - 4x4 матрицею в однорідних координатах

Ортогональні проєкції

Предмет з системою координат, до якої він віднесений, проєктують на довільну площину (картинна площину аксонометричної проєкції) таким чином, щоб ця площина не співпадала з його координатної площиною.

Так як картинна площина не паралельна жодній з координатних осей, то маються спотворення відрізків по довжині паралельних координатним осям. Це спотворення може бути рівними по всім трьом осях - ізометрична проєкція, по двом осям - діаметрична проєкція, різні спотворення по всім трьом осям - тріметрична проєкція.

Будь-який об'єкт, в тому числі і об'ємний, може бути зображений різними способами.

В одному випадку необхідно показати внутрішню структуру об'єкта, в іншому - його зовнішню форму, в третьому - імітувати реальну дійсність.

Умовно способи візуалізації можна розділити за характером зображень і за ступенем складності відповідних алгоритмів на рівні :

1) каркасна (дротова) модель ;

2) представлення поверхонь у вигляді багатокутників з плоскими гранями або сплайнів з видаленням невидимих точок ;

3) представлення поверхонь з використанням методів зафарбовування об'єктів для імітації відбиття світла, затінення, прозорості, накладення текстур.

Однією з найважливіших задач при візуалізації складних тривимірних сцен є визначення того, які частини об'єктів (ребра, грані), що перебувають у тривимірному просторі, будуть видні при заданому способі проєцювання, а які закриті від спостерігача іншими об'єктами.

Задача видалення невидимих ліній і поверхонь досить складна і часто вимагає значних обсягів обчислень.

Існує велика кількість різних методів розв'язання цього завдання, включаючи і апаратні.

Ці методи розрізняються за такими основними параметрами.

1. За способом представлення об'єктів:

- аналітичні (явні і неявні);
- параметричні;
- полігональні.

2. За способом візуалізації сцени.

При побудові каркасних зображень (wireframe - малюються тільки ребра) використовуються методи видалення невидимих ліній (ребер каркасних зображень),

для візуалізації суцільних зображень (solid - малюються зафарбовані грані) - методи видалення невидимих поверхонь (граней суцільних зображень).

3. За простором, в якому проводиться аналіз видимості:

- методи, що працюють безпосередньо в просторі самих об'єктів;
- методи, працюють у просторі картинній площині, тобто працюють з проекціями об'єктів.

Більшість алгоритмів видалення невидимих граней і поверхонь тісно пов'язане з різними методами сортування. Одні алгоритми проводять сортування явно, в інших вона присутня в прихованому вигляді. Наближені методи розрізняються фактично тільки порядком і способом проведення сортування.

Дуже поширеною структурою даних в задачах видалення невидимих ліній і поверхонь є різні типи дерев: виконавчі (BSP - trees), четверичні (Quadtrees), восьмиричні (Octtrees) та ін.

Лекція 1.3. Видалення невидимих ліній і поверхонь. Методи видалення невидимих ліній..

Задача видалення невидимих ліній і поверхонь. Класифікація методів видалення невидимих ліній і поверхонь. Рівні візуалізації. Методи видалення невидимих ліній. Методи переборного типу. Метод Z-буфера. Алгоритм Робертса. Алгоритм художника.

Методи переборного типу.

Метод Z-буфера.

Методи видалення нелицьових граней багатогранника.

Алгоритми Варнака і Вейлера - Азертон.

Алгоритм Робертса.

Методи пріоритетів (художника, плаваючого горизонту).

Метод двійкового розбиття простору.

Алгоритми порядкового сканування для криволінійних поверхонь.

Алгоритм визначення видимих поверхонь шляхом трасування променів (ray casting), і т.д.

Метод переборного типу

Сортування граней по глибині передбачає малювання полігонів і граней від найдалших до найближчих. Він не є універсальним, оскільки іноді не можна чітко розрізнити, яка грань ближче.

Метод сортування по глибині ефективний для показу поверхонь, заданих функціями

$$z = f(x, y).$$

Метод Z-буфера

Метод Z-буфера ґрунтується на використанні додаткового масиву, буфера в пам'яті, в якому зберігаються координати точок Z для кожного пікселя растру. Координата Z відповідає відстані точок просторових об'єктів до площини проекції.

Цей метод простий і ефективний завдяки тому, що не вимагає сортування об'єктів або їх точок. При малюванні об'єктів, які описуються багатокутниками або полігональними сітками, маніпуляції зі значеннями Z-буфера легко поєднати з виведенням пікселів заповнення полігонів плоских граней.

В даний час метод Z-буфера використовується в багатьох графічних 3d-акселераторах, які апаратно реалізують цей метод.

Алгоритм Робертса

Алгоритм Робертса призначений для побудови опуклих замкнених поверхонь з плоскими гранями і виводить на екран тільки лицьові грані, звернені зовнішньою стороною до спостерігача.

Метод плаваючого горизонту

Грані виводяться в послідовності від найближчих до найдалших. На кожному кроці кордону граней утворюють дві ламані лінії - верхній горизонт і нижній горизонт. Під час виведення кожної нової грані малюється тільки те, що вище верхнього горизонту, і те, що нижче нижнього горизонту. Кожна нова грань піднімає верхній і опускає нижній горизонти. Цей метод часто використовується для показу поверхонь, описуваних явним рівнянням $z = f(x, y)$.

Алгоритм художника

Алгоритм художника призначено зображення довільних поверхонь і виводить на екран всі комірки цілком у міру їх наближення до спостерігача. Проекції ближніх граней можуть частково або повністю накладатись на раніше побудовані проекції далеких граней подібно до того, як художник наносить на полотно один мазок поверх раніше нанесеного мазка, тим самим приховуючи останній від глядача.

Метод заснований на обчисленні віддаленості (глибини) ді центрів осередків сі (у різних варіантах алгоритму використовуються і інші опорні точки осередків) від спостерігача, сортуванню та виведенні осередків у порядку зменшення елементів вектора d .

Алгоритм художника відрізняється високою швидкістю, але, на жаль, має серйозний недолік: осередки каркаса повинні бути приблизно однакового і досить малого розміру в порівнянні з габаритами поверхні. При певному ракурсі різновеликі осередки можуть бути виведені на екран в невірному порядку.

Загальним недоліком алгоритму Робертса і алгоритму художника, які виводять грані, є неможливість правильного зображення двох осередків, що перетинаються та кожного з яких видно лише частково.

Лекція 1.4. Визначення видимих поверхонь.

Візуальне сприйняття об'єктів навколишньої дійсності являє собою складний процес, що має як фізичні, так і психологічні аспекти.

Фізичні аспекти сприйняття:

1. відображення,
2. переломлення,
3. розсіяння,
4. каустики,
5. фарба,
6. текстура і т.д.

Модель освітлення - це математичне подання фізичних властивостей джерел світла і поверхонь, а також їх взаємного розташування.

Проста модель освітлення заснована на обчисленні інтенсивності відбиваного об'єктом світла від точкового джерела.

Джерела світла:

Спектр випромінювання (колір)

Геометрія (положення і колір)

Спрямоване ослаблення

Властивості поверхні:

Спектр відбиття (колір)

Геометрія (положення, орієнтація і мікро-структури)

Поглинання спрощення:

- Використовуйте тільки пряме освітлення від випромінювачів для відбивачів

- Ігнорувати геометрії випромінювачів, використовуйте тільки геометрії відбивача

Найпростіша модель освітлення.

- Має на увазі рівне освітлення для всіх об'єктів сцени з усіх боків, I_a
- Сумарна кількість відображених розсіяних променів довільній поверхнею визначається коефіцієнтом фонового відображення, K_a .

- Таким чином колір деякій поверхні залежить від $I = I_a * K_a$

- Дана модель не враховує і не використовує ніяких фізичних законів взагалі!

Джерела висвітлення - точкові, спрямовані (прожектори) та світловипромінюючі поверхні (неонові лампи).

Освітлення може так само бути «розсіяним» (фоновим).

Властивості відбитого світла залежать від будови, напрямки та форми джерела світла, від орієнтації і властивостей поверхні.

Відбите від об'єкта світло

- дифузне

Дифузне відображення відбувається при рівномірному по всіх напрямках розсіюванні світла, тому створюється ілюзія, що поверхні мають однакову яскравість незалежно від кутів огляду. Розсіяне світло практично завжди присутня в реальній обстановці.

- дзеркальне

Дзеркально відбите світло не розсіюється. Кут відбиття від ідеальної поверхні, що відбиває дорівнює куту падіння. У будь-якому іншому положенні спостерігач не бачить дзеркально відбите світло. Завдяки дзеркальному відображенню на блискучих предметах з'являються відблиски.

Моделі зафарбовування граней

1. Найпростіше / плоске зафарбування

- Обчислюється нормаль до межі

- За допомогою деякої моделі освітленості обчислюється інтенсивність освітлення грані в деякій точці (будь-який!)

- Всі пікселі грані забарвлюються в даний колір.

2. метод Гуро

- Обчислити нормаль до кожної грані

- Визначити «нормалі» у кожній вершині, усередненням нормалей прилеглих граней

- Визначити інтенсивність (колір) для кожної вершини

- Зафарбувати грань за допомогою лінійної інтерполяції кольорів у вершинах граней

Гуро (Гуро) узагальнив їх підхід для довільних полігонів.

Зафарбування (затінення) по Гуро - це метод лінійної інтерполяції освітленості в межах одного полігону. Він був винайдений в 1971 і носить ім'я свого винахідника. Це простий і ефективний метод додання відчуття зігнутої для рівного полігону. З точки зору фізики - даний метод не коректний.

Цей метод також часто використовується для скорочення глибини промальовує сцени шляхом імітації зникнення віддалених об'єктів в тумані.

Модель з плоским зафарбовуванням полягає в рівномірному однорідному зафарбовуванні кожного трикутника одним кольором (звичайна заливка) .

В результаті об'єкт постає як безліч плоских граней.

У процедурах зафарбовування за Гуро і за Фонгом колір інтерполюється щодо вершин трикутника , що приводить до більш реалістичної і безперервної зафарбовування об'єкта.

Метод Гуро - для вершин кожного полігону по нормалям обчислюються колір, а потім проводиться їх інтерполяція в рамках полігону.

В алгоритмі Гуро нормаль у вершині багатогранника обчислюється шляхом усереднення нормалей до граней, що примикають до цієї вершини.

Така побудова сильно залежить від характеру розбиття.

Фонг запропонував замість інтерполяції інтенсивностей справити інтерполяцію вектора нормалі до поверхні на скануючої рядку .

Нормалі обчислюються в кожній вершині. Вектора нормалей інтерполюються уздовж кожної площині. Освітленість обчислюється в кожній точці поверхні по нормалі в даній точці.

Метод Фонга - інтерполюються нормалі , а не кольори (більше витратний, але більш точний) .

Цей метод вимагає великих обчислювальних витрат , оскільки формули інтерполяції застосовуються до трьох компонентів вектора нормалі , але зате дає кращу апроксимацію кривизни поверхні .

Цей метод дозволяє усунути ряд недоліків методу Гуро , але не всі.

Зокрема , ефект смуг Маху в окремих випадках у методі Фонга буває навіть сильніше , хоча в переважній більшості випадків апроксимація Фонга дає кращі результати.

Графічний конвеєр - це логічна сукупність обчислень, які виконуються послідовно і дають на виході сцену.

Обчислення в конвеєрі розділені на кілька етапів, в кожному з яких апаратно або програмно виконується певна функція.

Стадія геометричних перетворень

- Розбиття геометричних моделей на примітиви .
- Модельні перетворення.
- Освітлення .
- Видові перетворення

Стадія рендеринга

На стадії рендеринга визначаються пікселі зображення та їх адреси. У відмінності від стадії геометричних перетворень, в процесі рендеринга обсяг операцій з плаваючою точкою значно менше і в основному складається з простих операцій над пікселями.

Модуль № 2. «Використання 3D технологій для створення анімацій, відео, друкування та звукового супроводу.»

Лекція 2.1. 3D відео. 3D анімація.

Ідея створити картинку в 3D зводиться в поділі кадру для правого ока і лівого - у вигляді окремих відеопотоків. Адже фактично очі людини - це по суті справи дві камери, розташовані на відстані (базисі) один від одного.

Ідею 3D відео запропонували ще в 70-і роки, коли просто запропонували робити змішаний відеопотік, а на очі встановлювати спеціальні фільтри у вигляді окулярів. З тих пір технологія зробила крок вперед, залишивши за собою різні варіанти розробок, і тому відео 3D не має чіткого єдиного стандарту.

В основі всіх технологій створення об'ємного ефекту лежить одна і та ж вихідна передумова: для кожного ока створюється своє, скориговане в перспективі зображення. Ці зображення відтворюються або одночасно, або по черзі так, щоб це було непомітно для ока, а мозок сам з'єднав їх в один кадр.

Анагліф 3D відео

Даний стандарт відео відрізняє режим відображення картинки, розділяючи його за кольірною гамою. Фактично відеопотоки на різні очі використовуються зі зміщенням кольорової палітри, наприклад, лівостороння в червоний відтінок, правобічна - в синій. При передачі в форматі RGB (Червоний, зелений, синій), правий і лівий очі отримують картинку в різних кольорах. Для перегляду такого відео потрібні досить прості окуляри з цветофільтров, і відео в анагліф стандарт досить популярно на файлообмінниках, при продажу 3D DVD фільмів. Зазвичай в комплекті йдуть спеціальні 3D окуляри з такими фільтрами. Існують кілька видів 3D стандарту, що відрізняються за типом поділу картинки:

- Above / Below - коли картинка знаходиться одна під інший (потрібен спеціальний плеєр для поділу)
- Горизонтальна стереопара - картинка
- Анагліф може відрізнитися за типом цветофільтров, причому немає строгого стандарту поділу, які відтінки будуть фільтрами, і що буде праворуч і ліворуч. Плеєр спеціальний може знадобитися

Анагліф - це одна з перших технологій, і ми зможемо виділити її основні переваги та недоліки:

Переваги анагліф 3D

- Досить поширена технологія
- Недорого обійдеться покупка очок
- Фільми в даному форматі легко дістати

Недоліки анагліф 3D

- Більше одного перегляду в кілька днів (до 1,5 годин поспіль) не рекомендується, очі швидко втомлюються
- Порушено кольору, відео в 2D виглядає набагато більш насиченою
- Кілька різновидів - червоно-синій, червоно-синьо-зелених анагліф, іноді право- і лівостороння частина можуть бути навпаки. Для перегляду іноді потрібен, а іноді не потрібен додатковий плеєр для програвання.

Dolby 3D технологія

Ідею використання проектора, як демонстрації 3D кіно в кінотеатрах, запропонувала і запатентувала компанія Dolby. Як стандарт використовується проектор, перед яким знаходиться спеціальний обертовий світлофільтр, який розділяє картинку за кольірною гамою. Проектується картинка передається на екран, і для перегляду використовуються спеціальні 3D окуляри, фільтруючі за

кольором зображення. На кожному кадрі диск робить три повних оберти, при цьому поперемінно фільтруючи колірної потік. Наприклад, для частоти кадру 24 в секунду, то за хвилину диск робить 4320 обертів на хвилину.

Переваги технології

- Дозволяє якісно і недорого дивитися кіно через проектори
- Досить коректна передача кольору

Недоліки технології Dolby 3D

• Застосовується тільки в кінотеатрі. Для ТВ така технологія поки можливо непридатна для будинку.

- Вимагають спеціальний тип очок, який зареєстрований за Dolby

Затворна система 3D відео XpanD (інтерлейс)

Досить нова технологія з'явилася недавно. Практичне застосування як товар, затворна 3D технологія отримала через продаж високочастотних 3D моніторів, втілившись у 3D відеоігри. Відео в даному варіанті показується за принципом чересрядковості. Технологія називається як чересстрочная стереопара, картинка відображається в непарних рядках для одного ока, в парних - для іншого. Тому для поділу відеокартинки використовується технологія затворів очок, як правило, вартість їх досить дорога, і технологія працює за принципом частотної синхронізації з екраном і блокуванні картинки для іншого ока синхронно з відображенням. Тобто, 120 герцовий монітор дозволяє зрізати до 60 герц частоту на кожне око по черзі. Така система не порушує сприйняття, як анагліф, але вимагає обов'язково використання спеціальних окулярів, які зазвичай постачаються під обладнання для перегляду. Технологія XpanD використовує спеціальні монітори, телевізори 3D і зазвичай поставляє до них спеціальні окуляри, які мають кнопки включення і ІК датчик для синхронізації зображення з джерелом. При включенні 3D-окулярів картинка стає трохи темніше.

Переваги затворного 3D XpanD інтерлейс

- Ні ефекту втоми очей
- Правильна передача кольору
- Максимально якісне 3D зображення

Недоліки затворного 3D XpanD інтерлейс

• Потрібні спеціальні окуляри і монітори (ТВ) для перегляду

• Проектор не здатні працювати в технології XpanD, немає можливості синхронізувати картинку

- Фільми в такому форматі мають менше поширення

Система поляризованого 3D відео

Досить стара ідея, але недавно широко реалізована, заснована на технології поляризації світлового потоку. Як відомо, фізичні властивості світла - хвильові, і якщо пропускати світло через поляризаційні кристали, наприклад - турмаллін, - світловий потік можна розділити по його типу поляризації, а через два перпендикулярно розташованих кристала потік можна повністю обмежити. Технологія не так давно набула поширення у вигляді двох стандартів - IMAX і RealD

IMAX 3D відео

Щодо IMAX 3D можна говорити багато, ми зупинимося на основних особливостях. У даній технології використовується лінійна поляризація вихідних потоків світла від пари проекторів високої потужності на спеціальний екран, і відбите світло сприймається через поляризаційні фільтри очок. Застосовується ця технологія для великих розміром кінотеатрів - 22 на 16 метрів на розмір екрану. Запис в IMAX йде на спеціальні 70-мм плівки здвоєними камерами. Висновок зображення йде за рахунок спарених газових 6кВт проекторів, що видають більшу кількість світла на екран, і передачі зображення за спеціальною технологією. Досягнення ефекту 3D засноване на поляризаційному зображенні, що відбивається від екрану. Екран не повинен впливати на поляризацію зображення, тому IMAX 3D кінотеатри використовують срібне покриття. Потужність світла 15 кВт ксенонових ламп настільки висока, що його можна було б побачити навіть на Місяці. Картинку можна дивитися в звичайних поляризаційних окулярах.

Перевага технології 3D IMAX

- Дозволяє отримати 3D зображення без втрат яскравості, кольору
- Якість 3D картинікі досить залишається високим
- Висока яскравість зображення

Недоліки технології 3D IMAX

- Доступно лише для кінотеатрів.
- При нахилі голови вліво або вправо стерео ефект порушується (особливість поляризаційних фільтрів)
- Вимагає дорогого устаткування і екрану, навіть для звичайного кінотеатру
- Використовуються спеціальні формати для звуку (6-канальний некомпресований), але дешевше, ніж RealD

RealD 3D відео

Серйозною особливістю цієї поляризаційної технології, запатентованої Sony, що вона не вимагає пари проєкторів. На відміну від IMAX 3D, тут використовується кругова поляризація, що усуває роздвоювання зображення при невеликих нахилах головою. Поляризаційний і ЖК фільтри проєктують поперемінно потік для правого і лівого ока з поворотом поляризації за і проти годинникової стрілки відповідно. Стабільність забезпечується в проєктуванні кожного кадру три рази, за рахунок 72 кадру в секунду. Використовується аналогічний тип екрану, як в IMAX, але за рахунок поляризації втрачається яскравість зображення. Технологія RealD XL дозволяє використовувати один проєктор на великі екрани.

Переваги технології RealD

- Використовується один проєктор
- Ні ефекту втрати стереозображення при нахилі голови

Недоліки технології RealD

- Невисока яскравість екрану
- Унікальність технології.

Лекція 2.2. 3D звук.3D друк.

3D звук

Звуки, що оточують нас, мають складну структуру, оскільки складаються з безлічі простих частотних складових. Завдяки відкриттям Фур'є, Ома, Юнга і їх послідовників ми зараз маємо справу з сучасним тривимірним представленням звукової моделі.

HRTF

Хоча, в сучасних 3D-емуляцій є своя перевага, - вони можуть емулювати лише зовнішні дії (поширення звукових хвиль в зовнішньому середовищі - повітрі). Вкладені в них математичні алгоритми мають погрішності відносно тієї інформації, яка поступає в наш мозок, але вони більше наближені до дії зовнішнього середовища і її фізики, яку ми вивчили досить доскональний.

Тому, кажучи далі про 3D-звуке, ми виключимо особові особливості людини як чинник, що виходить за рамки сучасних дослідів.

Суть дослідної моделі: у одній кімнаті знаходиться манекен з двома мікрофонами на місці правого і лівого вуха, в другій - слухач (людина) з одягненими на голову навушниками. У кімнаті з манекеном є той, що реальний випускає звукову хвилю джерело звуку, яка перетвориться в аналоговий сигнал за допомогою мікрофонів і відповідно передається на навушники (канал в канал). Але тут з'являється відразу декілька моментів, які роблять дані досліді лише наближеними до реальності.

Більшість звукових карт, що виходять сьогодні, підтримують 3D звук. Принаймні, так заявляють виробники.

DirectSound3D (DS3D)

Фірма Microsoft надає DS3D як один з компонентів DIRECTX, також, як Direct3D, що відповідає за виведення 3D графіки. Але на відміну від Direct3D, DirectSound3D підтримує так звані "розширення", типа EAX. Сам по собі стандарт DS3D є набором команд, за допомогою яких розробники програмних продуктів визначають де в просторі розташовані джерела звуку. Координати

джерел звуку в процесі виконання цих команд передаються на DS3D-совместимую звукову карту, яка розміщує їх в просторі і потім обробляє.

A3D 1.x

У першій версії DS3D не було апаратної підтримки 3D звуку. Фірма Aureal була зацікавлена в тому, аби використовувати апаратну обробку 3D звукових потоків, використовуючи ті ж команди. В результаті був розроблений новий стандарт, званий A3D. Аби змусити виробників включати підтримку A3D в їх ігри, Aureal випустила безліч допоміжних інструментів для полегшення цього завдання. Поява звукових карт, A3D, що підтримують, майже не використовуючи при цьому процесора, сподвигло розробників на включення 3D звуку в їх ігри. Окрім всіх команд DS3D, стандарт A3D має підтримку ще двох наворотів. Перший і найбільш важливий з них - це менеджер ресурсів. Він управляє 3D потоками, відтворними в грі і збільшує кількість одночасно відтворних картою 3D потоків. Виробник вибирає найбільш важливі звукові джерела для використання за допомогою A3D. Останні джерела не відтворюються взагалі, або відтворюються, використовуючи стерео-микшинг. Менеджер ресурсів допомагає вирішити проблему з надміром звукових потоків в грі, коли звукова карта просто не в змозі відтворити їх всіх, і деякі звуки "проковтнулися" або взагалі не відтворюються.

Інший дуже важливий наворот A3D - це покращувана дистанційна модель. За допомогою її можна імітувати знаходження під водою або в густому тумані.

A3D 2.0

Стандарт A3D 2.0 використовує ті ж самі команди, що і A3D 1.x, але є ще більш просунутим. Ось його переваги:

- Підтримка чіпа Vortex 2
- Підтримка більшої кількості 3D потоків
- Підтримка вищих частот, і HRTF файлів більшого розміру
- A2D - емуляція звуку A3D, що позиціює.
- Розширений менеджер ресурсів
- Підтримка Aureal Wavetracing - акустичні віддзеркалення, реверберації, перешкоди.

Environmental Audio eXtensions (EAX)

Environmental Audio - дослівно звук довкілля. Це новий стандарт, розроблений фірмою Creative Labs, створює ефекти довкілля, засновані на реверберації, - ехо-камера, реверберація і багато що інше.

Фірма Creative випустила три стандарти EAX.

EAX 1.0

- Підтримує зміну в грі місця реверберації і віддзеркалень.
- Має велику кількість пресетов.
- Дозволяє (обмежено) змінювати реверберацію оточення.
- Дозволяє автоматично змінювати інтенсивність реверберації, залежно від положення джерела звуку відносно слухача.

EAX 1.0 будує звукову сцену на основі заздалегідь створених пресетов, враховуючи дистанцію між джерелами звуку і слухачем. Відповідно, EAX 1.0 надає великий набір пресетов "на кожен випадок життя". Також є можливість змінювати параметри пізньої реверберації (демпінг, рівень) і автоматичну зміну рівня залежно від відстані. Завдяки цьому відбувається покращуване сприйняття відстані до джерела

EAX 2.0

- Оновлена ревербераційна модель.
- Додані ефекти звукових перешкод (Occlusions) і перешкод (Obstructions).
- Окреме управління початковими віддзеркаленнями і пізніми ревербераціями. Тривалий контроль розмірів приміщень. Покращувана дистанційна модель для автоматичного управління ревербераціями і початковими віддзеркаленнями, заснованими на місці розташування джерела звуку відносно слухача.
- Можливість враховувати звукові властивості повітря (поглинання звуку).
- Тепер для використання ефектів Environmental Audio не потрібний опис геометрії приміщення.

EAX 2.0 побудований на можливостях першої версії і створює ще реалістичніші ефекти засчет підтримки того, що перегородило і віддзеркалення звуку, а також на покращуваній технології визначення напрямку звуку.

EAX 3.0

- Контроль за ранніми ревербераціями і віддзеркаленнями для кожного джерела звуку.
- Динамічний перехід між моделями оточень.
- Покращувана дистанційна модель для автоматичного управління реверберацією і початковими віддзеркаленнями залежно від положення джерел звуку відносно слухача.
- Розрахунки Ray-Tracing (віддзеркалення променів) для здобуття параметрів віддзеркалення для кожного джерела звуку.
- Окремі віддзеркалення для далеких ехо-камера.
- Покращувана дистанційна вистава, покликана замінити статичні ревербераційні моделі.

EAX 3.0 поєднує другу версію з потужнішими можливостями. Новий рівень реалізму досягається засчет підтримки місцевих віддзеркалень, ізольованих віддзеркалень, тривалих переходів між звуковими сценами і іншими особливостями.

Sensaura 3D

Окрім Creative і Aureal існують інші компанії, розробляючі технології по створенню і розробці 3D звуку. Одна з них - Sensaura, розробляюча технологію Sensaura 3D. Технологія Sensaura існує більше десяти років. Розроблена для музичних потреб, тепер вона знайшла своє вживання в світі 3D ігор.

QSound's 3D Technology

QSound називає свій новий стандарт Q3D, який вони представили в 1991 році. QSound не продає чіпи, використовуючі Q3D технологію. Як і Sensaura, вони продають (ліцензують) свої розробки іншим фірмам. Найбільш відомі продукти, QSound -это Sega Dreamcast, що підтримують, VLSI Thunderbird, Trident 4DWAVE-DX.

Q3D може виводити звук лише на 2 колонки, або навушники. Для виведення звуку на навушники використовуються ті ж HRTF функції, що і в інших стандартах.

Q3D 2.0

Стандарт Q3D 2.0 підтримує виведення звуку на 4 колонки, за тим же принципом, що і SB Live! і MonsterSound. В майбутньому, QSound планує ввести новий алгоритм підтримки 4-х колонок, і вони вже розробляють підтримку виводу на більш ніж чотири колонки. Новий метод буде ефективніший, ніж просте регулювання 4-х колонок і швидше нагадуватиме Sensaura MultiDrive, де HRTF використовується для передніх і задніх колонок. Переваги такого способу в ефективнішому виведенні звуків, що знаходяться по сторонах спереду і ззаду слухача.

Технології 3D друку

В даний час кількість технологій об'ємної друку перевищила десяток, навіть якщо не брати до уваги схожі методи, які в силу патентних обмежень мають різні назви. Всі вони можуть бути зведені до декількох основних методиками.

Дві з них нагадують звичну струминну 2D-друк:

- Екструзія: матеріал розплавляється і в рідкому вигляді видавлюється через сопло (одне або декілька) малого діаметра; шари злипаються один з одним і при охолодженні застигають, набуваючи міцність.

- фотополімеризація: приблизно те ж, що і екструзія, але рідкий фотополімер застигає під впливом ультрафіолетового опромінення.

Є й подібності лазерних принтерів:

- Лазерне спікання: матеріал у вигляді порошку або гранул наноситься тонким рівномірним шаром і потім спікається з допомогою лазера, потім наноситься і спікається наступний шар і т.д. Точно так же, як у лазерних принтерів є «двоюрідні брати» - світлодіодні принтери, у цій технології є варіант, коли спікання проводиться не лазерним, а електронним променем.

- Лазерна стереолітографія: на поверхні рідкого фотополімеру засвічені лазером мікроділянки застигають і попиксельно утворюють ще один шар майбутнього об'єкта; потім відбувається занурення готового шару і формування наступного.

Але великій кількості методів аналогі зі світу 2D-друку підібрати важко:

- Ламінування: шари з тонких плівок, кожен з яких вирізається у формі перетину майбутньої деталі, послідовно з'єднуються нагріванням або тиском.
- Склеювання: з основи у вигляді порошку або гранул шари формуються за допомогою рідкого клею, що подається з сопла.

Стереолітографія (StereoLithography Apparatus, SLA)

Суть технології SLA: система сканування направляє промінь лазера на фотополімер, в результаті чого відбувається процес затвердіння матеріалу. Як фотополімер використовують твердий або крихкий практично прозорий матеріал, який досить легко склеюється, фарбується і обробляється.

Принцип технології наступний:

Принтер складається з резервуара, в який налита спеціальна рідина (фотополімер). При впливі на цю рідину спеціальним чином (лазер, УФ, ІК) рідина перетворюється в твердий пластик.

Зверху в рідину опускається спеціальна платформа, потім спеціальний промінь проходить по шару (як правило близько 0,03 мм) рідини під платформою. В результаті рідина твердне і прилипає до платформи. Таким чином 3D принтер створює перший шар предмета.

Потім принтер піднімає платформу на висоту шару і все повторюється заново.

Вибіркове лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS)

Цей метод з'явився приблизно в той же час, що і SLA, і навіть має з ним багато спільного, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 50-100 мкм, тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь спікають ділянки, що підлягають отвердженню на даному шарі моделі.

Вихідні матеріали можуть бути самі різні: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу спеціальним валиком, який при зворотному проході видаляє надлишки порошку. Потім працює потужний лазер, спікається частки один з одним і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, рівну висоті одного шару. Для зниження потужності лазера, необхідної для спікання, порошок в робочій камері попередньо нагрівається майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіше пікова потужність, а не тривалість впливу.

Частинки можуть плавитися повністю або частково (по поверхні).

Незапечені порошок, що залишається навколо отверділих шарів, служить підтримкою при створенні нависають елементів моделі, тому немає необхідності в формуванні спеціальних підтримують структур. Але цей порошок по закінченні процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель буде створюватися з іншого матеріалу, так і з порожнин вже виготовленої моделі, що можна зробити лише після її повного остигання.

Часто потрібне фінішна обробка - наприклад, полірування, оскільки поверхня може виходити шорсткою або з видимою слоистістю. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, але і в суміші з полімером або у вигляді частинок, покритих полімером, залишки якого потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі. Для металів одночасно відбувається заповнення виникають пустот бронзою.

Оскільки мова йде про високі температури, необхідних для спікання, процес відбувається в азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще і запобігає окисленню.

Метод багатоструєного моделювання (Multi Jet Modeling, MJM)

Багатоструєного моделювання - одна з найбільш перспективних технологій. В якості вихідних матеріалів застосовуються: фотополімери, пластик,

віск - для споживчих товарів і створення прототипів і спеціальні склади - для виготовлення протезів, медичних імплантатів і ювелірних прикрас.

Принцип роботи MJM: основний і допоміжний матеріали подаються на горизонтальну поверхню крізь дрібні друкувальних голівок принтера. Кількість сопел може варіювати від десятків до декількох сотень. Основний матеріал - фотополімер або віск, наноситься шар за шаром, що закріплюються за допомогою ультрафіолетової лампи, за заданим алгоритмом. Допоміжний матеріал заповнює утворюються порожнечі, що зберігає цілісність готового об'єкта.

3d технологія - MJM дозволяє виготовляти 3d-об'єкти з відмінними фізичними властивостями і високою якістю поверхні, з досить складною геометрією моделі.

Принтери, засновані на даній технології, випускаються компанією 3D Systems. У зв'язку з патентними обмеженнями є і назви, які використовуються іншими виробниками принтерів: PolyJet (Photopolymer Jetting, компанія Stratasys), DODJet (Drop-On-Demand Jet, компанія SolidScape). Звичайно, відмінності не тільки в назвах, але базові принципи схожі.

Пошарове наплавлення (Fusing Deposition Modeling, FDM)

Переваги пошарового наплавлення:

- висока точність готового прототипу;
- висока швидкість виготовлення моделі;
- можливість застосування широкого спектра матеріалів, різних полімерів;
- низька вартість створення прототипу виробу.

Недоліки FDM технології:

- обмеження розмірності моделі, що друкується на 3d-принтері;
- необхідність і складність подальшої обробки поста готового прототипу.
- невисока швидкість роботи (але, власне, дуже вже високою швидкістю не можуть похвалитися й інші технології: для побудови великих і складних моделей потрібні багато годин і навіть десятки годин);
- невелика роздільна здатність як по горизонталі, так і по вертикалі, що призводить до більш-менш помітної шаруватості поверхні виготовленої моделі;
- проблеми з фіксацією моделі на робочому столі (перший шар повинен прилипнути до поверхні платформи, але так, щоб готову модель можна було зняти); їх намагаються вирішити різними способами - підігрівом робочого столу, нанесенням на нього різних покриттів, проте зовсім і завжди уникнути не виходить;
- для нависаючих елементів потрібне створення відповідних структур, які згодом доводиться видаляти, але навіть з урахуванням цього деякі моделі просто неможливо зробити на FDM-принтері за один цикл, і доводиться розбивати їх на деталі з подальшим з'єднанням склеюванням або іншим способом.

Як і у всіх інших розглянутих нами технологіях, модель при FDM-друку створюється пошарово. Для виготовлення чергового шару термопластичний матеріал нагрівається в друкуючій голівці до напіврідкого стану і видавлюється у вигляді нитки через сопло з отвором малого діаметра, осідаючи на поверхні робочого столу (для першого шару) або на попередньому шарі, з'єднуючись з ним. Головка переміщається в горизонтальній площині і поступово «малює» потрібний шар - контури і заповнення між ними, після чого відбувається вертикальне переміщення (найчастіше опусканням стола, але є моделі, в яких піднімається головка) на товщину шару і процес повторюється до тих пір, поки модель не буде побудована повністю.

В якості витратного матеріалу найчастіше використовуються різні пластики, хоча є і моделі, що дозволяють працювати з іншими матеріалами - оловом, сплавами металів з невисокою температурою плавлення і навіть шоколадом.

Лекція 2.3. Графічні бібліотеки 3D мультимедіа.

Графічна бібліотека - це безліч функцій, які утворюють інтерфейс між прикладною програмою (або мовою програмування, за допомогою якого розробляється програма) і графічною системою. Графічні бібліотеки повинні

забезпечувати універсальність роботи прикладної програми на машинах з різним апаратним та програмним забезпеченням.

OpenGL - це графічний стандарт в області комп'ютерної графіки.

OpenGL (Open Graphics Library - відкрита графічна бібліотека) (1992) - апаратно-незалежна версія бібліотеки IRIS GL. Розробниками OpenGL є найбільші фірми-розробники як обладнання, так і програмного забезпечення: Silicon Graphics, Inc., Microsoft, IBM Corporation, Sun Microsystems, Inc., Digital Equipment Corporation (DEC), Evans & Sutherland, Hewlett-Packard Corporation, Intel Corporation і Intergraph Corporation.

Ключова особливість OpenGL - простота. Ядро OpenGL контролює процес обробки примітивів (тобто трикутників). Для передачі даних використовується процедурна модель, фактично - виклики функцій. У кожен момент часу стан OpenGL визначається через набір змінних, які задають параметри обробки (наприклад, накладати текстуру або не накладаються). Кожен новий переданий трикутник проходить обробку відповідно до поточним станом. Такий механізм дуже ефективний, а код зазвичай короткий і простий. Хоча ядро OpenGL процедурне, в використанні OpenGL спільно з об'єктно-орієнтованими технологіями складнощів зазвичай не виникає: все залежить від вибору програміста.

DirectX заснований на моделі COM (Component Object Model). Така архітектура має як переваги, так і недоліки. Зокрема, код, в якому використовуються виклики DirectX, зазвичай не є ідеалом легко читається і розуміється. Тому навіть малювання простого трикутника вимагає величезного обсягу коду. Розробники Microsoft, звичайно, розуміють це, тому для спрощення програмування ними створена окрема бібліотека DirectX Common Files, яка приховує часто використовуваний код.

У OpenGL існує механізм розширень, за допомогою якого можна використовувати різні функції, що не входять в базову специфікацію, а підтримувані тільки реалізацією OpenGL для конкретної відеокарти.

Цей процес виглядає наступним чином: як тільки виробник випускає відеокарту з підтримкою певної корисної функції, він включає її в свою реалізацію OpenGL (яка зазвичай входить в поставку драйвера). Для програміста ця можливість стає доступною, якщо він спеціальним чином запросить дане розширення. Звичайно, такий шлях не є універсальним: на іншій відеокарти зробити це не вийде з-за відмінностей в інтерфейсі. Тому існують розширення, схвалені ARB, - при їх використанні можна сподіватися, що вони будуть працювати на відкритих різних виробників. Такі розширення є кандидатами на включення в наступні версії OpenGL.

Серйозною перевагою OpenGL є перш за все те, що це "відкритий стандарт". Будь-яка компанія, що має апаратну платформу, може купити ліцензію у SGI і потім зробити власну реалізацію OpenGL. Зміни в OpenGL пропонуються, обговорюються і затверджуються представниками різних компаній. Що стосується DirectX, то тут ситуація прямо протилежна. Тільки Microsoft може вносити будь-які зміни в бібліотеку. Інакше кажучи, саме Microsoft в кінцевому підсумку визначає всі шляхи розвитку бібліотеки, і якщо шлях був вибраний невірною, це може бути виправлено тільки в новій версії.

DirectX - це набір певних інструментів і технологій, який використовують розробники ігор і мультимедійних додатків для того, щоб забезпечити взаємодію між драйверами пристроїв і операційною системою.

Стандарт DirectX включає в себе модулі підтримки: програмування двомірної графіки (модуль DirectDraw); створення тривимірної графіки (модуль Direct3D); роботи зі звуками та музикою (модулі DirectSound і DirectMusic); підтримки пристроїв введення (модуль DirectInput); розробки мережевих ігор (модуль DirectPlay).

DirectX - це інтерфейс низького рівня. За допомогою своїх API він надає програмісту прямий доступ до пам'яті адаптерів, де програміст може створювати зображення, зберігати графічні образи, звуки і т. д. За рахунок безпосередньої роботи з пам'яттю досягається прискорення, тобто теоретично частота, з якою

програміст зможе змусити промальовуватися екран буде залежати тільки від частоти, підтримуваної монітором.