

УДК 004.932.2

О.Н. Романюк, канд. техн. наук, доц., Вінниц.
нац. техн. ун-т

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕНДЕРИНГУ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

О.Н. Романюк. Программно-апаратная реализация рендеринга трехмерных изображений в системах компьютерной графики. Рассмотрены вопросы ускоренного расчета интенсивностей цвета для закрасивания трехмерных графических объектов.

O.N. Romanyuk. Hard and soft realization of rendering the three-dimensional images in the computer graphics systems. Some problems of accelerated computation of color intensities for shading 3D graphics objects are considered.

Бурхливий розвиток засобів обробки інформації, підвищення рівня автоматизації процесів виробництва та керування приводить до постійного зростання ролі комп'ютерної графіки, оскільки зображення є найбільш інформативним каналом зв'язку між людиною та ЕОМ. Застосування тривимірних зображень сьогодні має надзвичайно широкий спектр — від ігор, якими захоплюється маса користувачів, до систем автоматичного проектування, які використовуються в архітектурі, машинобудуванні та інших галузях.

Фундаментальна вимога тривимірної графіки полягає у формуванні з високою продуктивністю реалістичних графічних зображень, які точно відтворюють конструктивні та візуальні властивості реальних об'єктів. У зв'язку з цим актуальним є впровадження в сучасні графічні акселератори нових підходів і засобів, які суттєво підвищують якість формування тривимірних сцен.

Методи Гуро й Фонга на сьогодні є найбільш поширеними [1, 2]. Це обумовлено їх відносною простотою та задовільною якістю формування зображень. Ці методи в більшості випадків реалізують програмним шляхом, що не дозволяє формувати динамічні графічні сцени. Нові підходи до їх програмно-апаратної реалізації зафарбовування дозволяють суттєво підвищити продуктивність формування тривимірних зображень.

Теоретично доведено, що при зафарбовуванні за методом Гуро природи інтенсивностей кольору ΔI_{Γ} та $\Delta I_{\text{В}}$ відповідно вздовж горизонтальних та вертикальних рядків растеризації є постійними величинами, що виключає необхідність їх розрахунку для кожного рядка растеризації окремо [3]. Знайдено взаємозв'язок між приростами інтенсивностей кольору вздовж горизонтальних та вертикальних рядків растеризації. Доведено, що природи інтенсивностей ΔI_{Γ} , $\Delta I_{\text{В}}$, $\Delta I_{\text{Д}}$ відповідно в горизонтальному, вертикальному та діагональному напрямках є сталими і дорівнюють

$$\Delta I_{\Gamma} = \frac{(I_A - I_C) \cdot \Delta Y_{\text{BC}} - (I_B - I_C) \cdot \Delta Y_{\text{AC}}}{\Delta X_{\text{AC}} \cdot \Delta Y_{\text{BC}} - \Delta X_{\text{BC}} \cdot \Delta Y_{\text{AC}}}, \quad \Delta I_{\text{В}} = \frac{(I_B - I_C) \cdot \Delta Y_{\text{BC}} - (I_A - I_C) \cdot \Delta Y_{\text{AC}}}{\Delta X_{\text{AC}} \cdot \Delta Y_{\text{BC}} - \Delta X_{\text{BC}} \cdot \Delta Y_{\text{AC}}},$$

$$\Delta I_{\text{Д}} = \Delta I_{\Gamma} + \Delta I_{\text{В}},$$

де I_A, I_B, I_C — інтенсивності кольору у вершинах трикутника (рис. 1).

Отримана властивість дозволяє запропонувати ряд методів розпаралелення рендерингу Гуро [4].

У першому методі використовується триангуляція Серпінського першого порядку, яка полягає в розбитті вихідного трикутника на чотири складових шляхом проведення в ньому середніх ліній. З урахуванням того, що приріст інтенсивності кольору вздовж усіх рядків растериза-

ції є постійною величиною, можна запропонувати підхід, який полягає в зафарбовуванні тільки одного зі складових трикутників і трансформації результатів тонування на інші.

Під час зафарбовування виконують растеризацію тільки верхнього трикутника 1 і повторюють всі елементарні крокові прирости для інших трикутників з урахуванням того, що трикутники 1, 2, 3 мають однакові напрямки зафарбовування, а трикутник 4 зафарбовується в зустрічному напрямку (рис. 2). Перед растеризацією визначають координати вершин усіх складових трикутників.

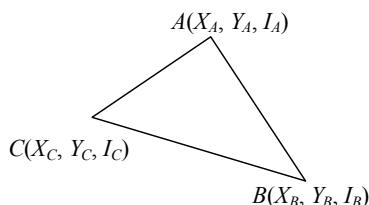


Рис. 1. Вихідний трикутник

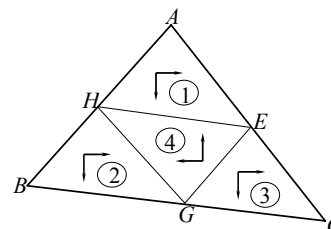


Рис. 2. Напрямки зафарбовування

Аналогічно при визначенні інтенсивностей кольору внутрішніх точок верхнього (лівого) складового трикутника дублюють усі дії кодової інтерполяції й для інших складових трикутників, але вже по відношенню до їх вершин.

Оскільки триангуляцію вихідного трикутника здійснюють шляхом ділення його ребер навпіл, а прирости сторін вихідного трикутника не завжди є парними, то виникає задача такого розбиття трикутника на складові, при якому будуть відсутні точки, які не будуть растеризовані.

Другий метод підвищення продуктивності зафарбовування за Гуро оснований на незалежному формуванні парних і непарних точок у рядку растеризації. У циклі підготування знаходять інтенсивності I_1, I_2 кольорів відповідно першої та наступної за нею точки у рядку растеризації. Інтенсивності I_{PB} перших точок у рядках растеризації знаходять шляхом кодової інтерполяції інтенсивностей кольору уздовж провідних ребер, а I_2 — за виразом: $I_2 = I_{PB} + \Delta I_{\Gamma}$.

$$I_4 = I_2 + 2\Delta I_P, I_6 = I_4 + 2\Delta I_P, \dots, I_{2w} = I_{2w-2} + 2\Delta I_P, \dots;$$

$$I_3 = I_1 + 2\Delta I_P, I_5 = I_3 + 2\Delta I_P, I_7 = I_5 + 2\Delta I_P, \dots, I_{2w+1} = I_{2w-1} + 2\Delta I_P, \dots.$$

Один із можливих підходів покращення рендерингу Гуро полягає у визначенні наявності відблисків на межах трикутника і у їх подальшому формуванні [5].

Нехай у ребрах трикутника $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$ задано відповідно вектори нормалей $\vec{N}_0, \vec{N}_1, \vec{N}_2$. При формуванні графічних зображень найбільш поширений випадок, коли джерело світла та спостерігач знаходяться в нескінченності, тобто вектор \vec{L} має однаковий напрямок для всіх точок трикутника. Було доведено, що в цьому випадку максимальні значення інтенсивності кольору мають місце на ребрах трикутника в таких точках

$$t_1 = \frac{\cos \gamma \cos \varphi - \cos \beta}{(\cos \varphi - 1)(\cos \beta + \cos \gamma)}, t_2 = \frac{\cos \gamma \cos \phi - \cos \lambda}{(\cos \phi - 1)(\cos \lambda + \cos \gamma)}, t_3 = \frac{\cos \beta \cos \vartheta - \cos \lambda}{(\cos \vartheta - 1)(\cos \lambda + \cos \beta)}.$$

Відповідність кутів між векторами нормалей відображено на рис. 3.

Змінні t_1, t_2, t_3 є параметричними і мають інтервал зміни від 0 до 1.

Вихідний трикутник може бути розбитий на декілька в залежності від результату порівняння порогового значення зі значеннями інтенсивностей кольору в точках t_1, t_2, t_3 . Отримані складові трикутники у подальшому зафарбовуються за методом Гуро. Такий підхід підвищує реалістичність рендерингу Гуро за рахунок формування відблисків у випадку їх перетину одним або декількома ребрами трикутника. При класичній реалізації рендерингу Гуро таке формування відсутнє і відблиск відфільтровується, що є суттєвим артефактом.

У системах комп'ютерної графіки найбільшого поширення отримала модель освітлення Бліна [1, 2], згідно з якою інтенсивність спекулярної складової кольору розраховується за формулою:

$$I_s = I k_s \cos^n \gamma,$$

де I — інтенсивність зовнішнього джерела світла;

k_s — коефіцієнт спекулярного відбиття;

γ — кут між вектором нормалі \vec{N} до поверхні та вектором \vec{N} , який отримують шляхом додавання вектора напрямку світла \vec{L} та вектора спостереження \vec{V} ;

n — коефіцієнт спекулярності поверхні.

Найбільший обсяг обчислень при розрахунку інтенсивності спекулярної складової кольору припадає на визначення двопроменевої дистрибутивної функції (BRDF) $\cos^n \gamma$, $n = \overline{1, 1000}$. Запропоновано нову BRDF, яка має значно менший порядок відносно BRDF типу $\cos^n \gamma$. Вона має вигляд $\cos^k(\sqrt{n/k} \cdot \gamma)$, де k — коефіцієнт, який визначається у залежності від значення коефіцієнта спекулярності поверхні n ($k \ll n$).

Запропоновано для забезпечення необхідної точності апроксимації використовувати для різних діапазонів значень n різні степені k . Так, наприклад, при апроксимації функції $\cos^n \gamma$ функцією $\cos^k(\sqrt{n/k} \cdot \gamma)$ з відносною похибкою в 3% достатньо взяти два значення k : 1, 3.

Запропоновано модифікацію відомої BRDF Шліка, яка полягає у використанні різних значень степенів функції залежно від значення коефіцієнта спекулярності. Формула має такий вигляд:

$$\cos^{\lfloor 2^{\log_2 n - 2} \rfloor} \gamma / (n - n \cos \gamma + \cos \gamma).$$

Розглянуто питання апроксимації BRDF функцією другої та третьої степені, а також питання апаратної реалізації.

Із метою підвищення продуктивності зафарбовування запропоновано в одному обчислювальному процесі комбіновано використовувати методи Гуро та Фонга. Так, наприклад, можна рядок растеризації розбити на цифрові сегменти розміром, кратним степені двійки. Значення інтенсивностей кольору за методом Фонга визначається в кінцевих точках сегменту, а в проміжних — за методом Гуро. Довжина цифрового сегменту може адаптивно змінюватися та визначається кривизною поверхні та напрямком вектора \vec{N} .

При визначенні спекулярної та дифузної складової інтенсивності кольору точок тривимірної поверхні за методом Фонга необхідно виконувати нормалізацію векторів нормалей. Це пояснюється тим, що косинуси кутів, які входять у функцію тонування, найбільш просто знайти через скалярний добуток векторів одиничного розміру. Враховуючи, що для кожної точки поверхні нормалізація виконується для векторів спостерігача, джерела світла та вектора нормалі до поверхні, актуальним є питання зменшення обчислювальної складності цієї трудомісткої процедури.

Запропоновано метод адаптивної нормалізації векторів нормалей. Нормалізація векторів нормалей виконується тільки для тих випадків, коли вона суттєво впливає на точність визначення інтенсивності кольору.

Наведено приклад визначення проміжних векторів нормалей між векторами \vec{N}_a , \vec{N}_b , які розміщено в кінцевих точках рядка пастеризації (рис. 4). Показано, що $\frac{d_{(1/2^i)}}{d_{(1/2^{i+1})}} \approx 4$. Отримано

таке співвідношення для визначення похибок $d_{(1/2^i)}$:

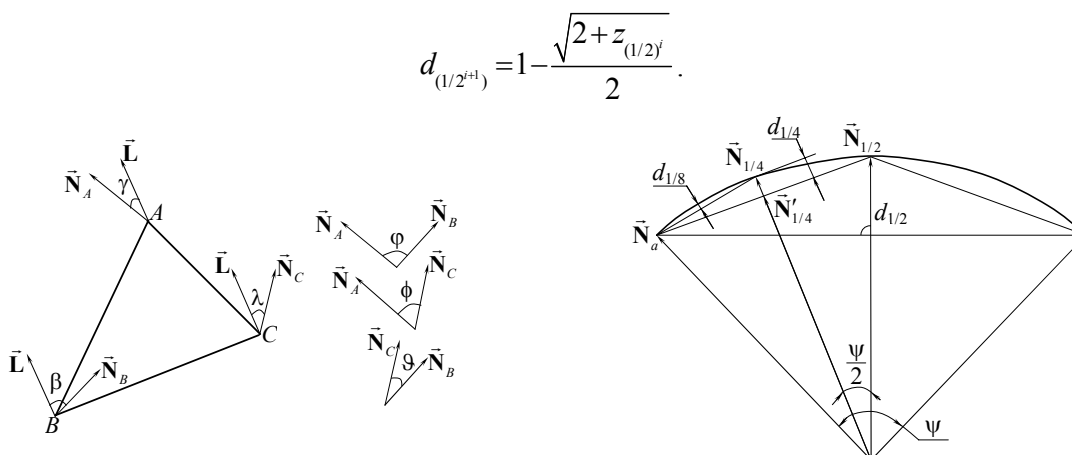


Рис. 3. Вектори нормалей трикутника AB

Рис. 4. Визначення проміжних векторів нормалей

Запропоновано при значеннях похибки $d_{(1/2^j)}$, менших деякого порогового значення, використовувати лінійне інтерполювання між векторами нормалей.

Вектори нормалей отримують шляхом поділу кута між заданими векторами навпіл. Так, наприклад,

$$\vec{N}_{(1/2)} = \frac{\vec{N}_a + \vec{N}_b}{\sqrt{2(1 + \cos \psi)}} = \frac{\vec{N}_a + \vec{N}_b}{z_{(1/2)}},$$

де $z_{(1/2)} = \sqrt{2(1 + \cos \psi)}$.

Для подальшого поділу використовують формули

$$\vec{N}_{(1/2^{n+1})} = \frac{\vec{N}_a + \vec{N}_{(1/2^n)}}{\sqrt{2 + z_{(1/2^n)}}}, \quad z_{(1/2^{n+1})} = \sqrt{2 + z_{(1/2^n)}}.$$

Розглянуто питання використання для рендерингу Фонга сферично-кутової інтерполяції.

Знайдено рекурентні співвідношення, згідно з якими вектор нормалі до потокової точки можна розрахувати через вектори нормалей до двох попередніх точок, тобто

$$\vec{N}(t+1) = 2\vec{N}(t) \cos \varphi - \vec{N}(t-1),$$

де кут між початковим та кінцевим векторами в рядку rasterизації. Аналогічно визначається дифузона складова кольору

$$I(t+1)_d = 2I(t)_d \cos \varphi - I(t-1)_d.$$

Використання знайдених рекурентних співвідношень дозволяє звести обчислення дифузної складової кольору та скалярного добутку $\vec{N} \cdot \vec{N}$ всього до двох операцій множення, двох операцій віднімання та двох операцій зсуву, що дозволяє в середньому на 40 % підвищити продуктивність зафарбовування.

Розроблено адаптивний метод зафарбовування, у якому використано різні моделі освітлення залежно від наявності в межах трикутника зони відблиску [6]. Підвищення продуктивності досягається за рахунок того, що тільки при наявності відблиску використовують модель освітлення, яка враховує спекулярну складову кольору, а в усіх інших випадках — просту модель, яка має суттєво меншу обчислювальну складність. Запропоновано метод визначення факту перетину ребром трикутника відблиску або його ідентифікації всередині трикутника.

Запропоновані методи дозволяють суттєво підвищити продуктивність зафарбовування та можуть бути використані для побудови програмно-апаратних засобів комп'ютерної графіки

Література

1. Херн Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL / Херн Д., Павлин Бейкер М. — М.: Издат. дом “Вильямс”, 2005. — 1168 с.
2. Цисарж В.В. Математические методы компьютерной графики / Цисарж В.В., Марусин Р.И. — К.: Факт, 2004. — 464 с.
3. Романюк О.Н. Один із шляхів спрощення обчислювального процесу при зафарбовуванні тривимірних об'єктів за методом Гуро // Вимірюв. та обчислюв. техніка в технол. процесах. — 2004. — № 2, — С. 72 — 75.
4. Romanyuk O.N. Effective algorithms of rendering procedure parallelization for realistic image forming / Romanyuk O.N., Chornij A.V. // Proc. of the 6th intern. conf. on Development and Application System. — Suceava, 2002. — P. 357 — 362.
5. Романюк О.Н. Новый підхід до підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних об'єктів за методом Гуро // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2005. — № 3. — С. 106 — 110.
6. Romanyuk O.N. Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation / Romanyuk O.N., Chornij A.V. // IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. September 2005, Sofia, Bulgaria. — P. 615 — 619.

Надійшла до редакції 12 червня 2007 р.
