

30.11.2024

Модель освещения Фонга является простой, популярной и широко известной в компьютерной графике.

Описание модели было представлено в следующей статье
Bui Tuong Phong "Illumination for Computer Generated
Pictures" University of Utah (1975 г.)

2024-11-30

Модель Блинна-Фонга

└ Введение

Введение

Модель освещения Фонга является простой, популярной и широко известной в компьютерной графике.
Описание модели было представлено в следующей статье
Bui Tuong Phong "Illumination for Computer Generated
Pictures" University of Utah (1975 г.)

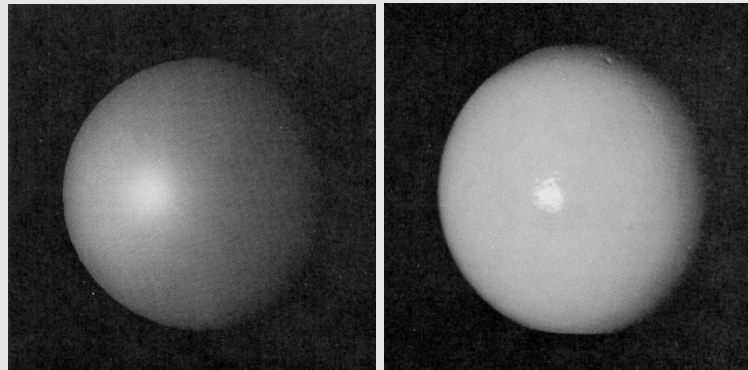


Рис. 1: Изображения из статьи: сфера, отображенная с улучшенным затенением (слева); фотография реальной сферы(справа)

Введение

В основе модели освещения Фонга лежит алгоритм приближенного расчета интенсивности света на поверхности объектов.

Один из вариантов рабочей формулы имеет вид:

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V)^{\alpha_j} \right]$$

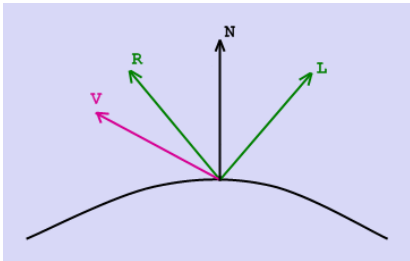


Рис. 2: Схема расположения векторов модели освещения

Модель Блинна-Фонга

2024-11-30

Введение

Введение

В основе модели освещения Фонга лежит алгоритм приближенного расчета интенсивности света на поверхности объектов. Один из вариантов рабочей формулы имеет вид:

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V)^{\alpha_j} \right]$$

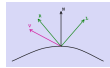


Рис. 2: Схема расположения векторов модели освещения

Формула состоит из следующих частей:

- фоновое освещение I_a ;
- количество ИС m ;
- интенсивность излучения j -го источника света I_j ;
- функция затухания $\frac{1}{d+k}$;
- свойства поверхности k_a, k_d, k_s в точке поверхности;
- диффузное рассеивание $(N_j \cdot L_j)$;
- зеркальное рассеивание $(R_j \cdot V)^{\alpha_j}$.

Настройка этих компонентов позволяет создавать реалистичные изображения (для того времени) трехмерных объектов с учетом их взаимодействия с источниками света.

Источники света (ИС) и интенсивность излучения

ИС (Light) — любой объект, излучающий энергию.
Интенсивность излучения (I) — физическая величина, характеризующая мощность электромагнитного излучения (например, света) в определенном направлении от источника.

Математически интенсивность излучения рассчитывается как:

$$I = \frac{P}{A},$$

где P — мощность излучения (в ваттах), A — площадь, через которую проходит излучение (в м^2).

Модель Блинна-Фонга

Источники света (ИС) и интенсивность излучения

Следует понимать, что:

1. Значения Для каждой компоненты цвета считается независимо, т.е. $I = (I_r, I_g, I_b)$.
2. Суммарное освещение вычисляется как:

$$I = k_e + k_a I_a + \sum_j I_j,$$

где k_e — коэффициент излучения светом материалом;
 $k_a I_a$ — глобальная фоновая освещенность сцены;
 I_j — вклад вносимый j -м ИС.

Источники света (ИС) и интенсивность излучения

ИС (Light) — любой объект, излучающий энергию.
Интенсивность излучения (I) — физическая величина, характеризующая мощность электромагнитного излучения (например, света) в определенном направлении от источника.

Математически интенсивность излучения рассчитывается как:

$$I = \frac{P}{A},$$

где P — мощность излучения (в ваттах), A — площадь, через которую проходит излучение (в м^2).

2024-11-30

Радиальное затухание

Известно, что чем дальше расположен объект от ИС, тем слабее интенсивность света на поверхности этого объекта.
Поэтому необходимо учитывать интенсивность затухания (attenuation) света между источником света и поверхностью.

Интенсивность радиального затухания света определяется законом обратных квадратов (Inverse-Square Law):

$$f_r(d) \sim \frac{1}{d^2},$$

где d — расстояние от объекта до ИС.
Но на практике применяют следующую функцию

$$f(d) = \begin{cases} \frac{1}{a_0 + a_1 d + a_2 d^2}, & \text{для локальных ИС} \\ 1, & \text{для бесконечно-удаленных ИС} \end{cases},$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты, подбираемые практическим путем в зависимости от сцены.

Модель Блинна-Фонга

2024-11-30

Радиальное затухание

Радиальное затухание

Известно, что чем дальше расположен объект от ИС, тем слабее интенсивность света на поверхности этого объекта.
Поэтому необходимо учитывать интенсивность затухания (attenuation) света между источником света и поверхностью.

Интенсивность радиального затухания света определяется законом обратных квадратов (Inverse-Square Law):

$$I_r(d) \sim \frac{1}{d^2}$$

где d — расстояние от объекта до ИС.
Но на практике применяют следующую функцию

$$f(d) = \begin{cases} \frac{1}{a_0 + a_1 d + a_2 d^2}, & \text{для локальных ИС} \\ 1, & \text{для бесконечно-удаленных ИС} \end{cases}$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты, подбираемые практическим путем в зависимости от сцены.

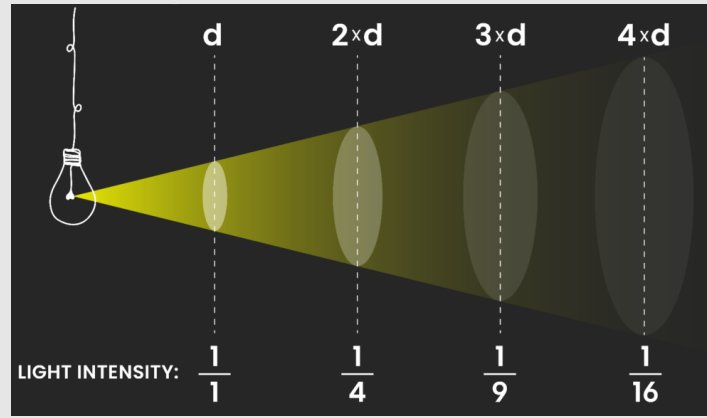


Рис. 3: Закон обратных квадратов

Угловое затухание

Угловое затухание — явление, при котором интенсивность света затухает по мере увеличения угла между направлением, из которого свет падает, и нормалью к поверхности.

Угловое затухание интенсивности выражается следующей формулой

$$f_{\alpha}(\theta) = \cos^{\alpha} \theta = \left(\frac{L \cdot D}{|L||D|} \right)^{\alpha}$$

где L — вектор направления от источника света к точке поверхности освещения; D — вектор направления источника света; θ — угол между этими векторами; α — коэффициент фокусировки, управляющий концентрацией света внутри конуса.

Примечание.
Коэффициент углового затухания θ уменьшает интенсивность света по мере увеличения угла. Когда свет падает под прямым углом (угол), угловое затухание равно 1, и свет не затухает. При увеличении угла, значение косинуса уменьшается, что приводит к уменьшению интенсивности света.
При $\alpha \ll 1$ получается имитация мягкого, рассеянного света.
При $\alpha \gg 1$ — имитация узкого прожектора или лазера.

Модель Блинна-Фонга

└ Угловое затухание



Рис. 4: Интенсивность затухания света в зависимости от угла θ и коэффициента фокусировки α

Угловое затухание — явление, при котором интенсивность света затухает по мере увеличения угла между направлением, из которого свет падает, и нормалью к поверхности.
Угловое затухание интенсивности выражается следующей формулой
$$f_{\alpha}(\theta) = \cos^{\alpha} \theta = \left(\frac{L \cdot D}{|L||D|} \right)^{\alpha}$$

где L — вектор направления от источника света к точке поверхности освещения; D — вектор направления источника света; θ — угол между этими векторами; α — коэффициент фокусировки, управляющий концентрацией света внутри конуса.
Примечание.
Коэффициент углового затухания θ уменьшает интенсивность света по мере увеличения угла. Когда свет падает под прямым углом (угол), угловое затухание равно 1, и свет не затухает. При увеличении угла, значение косинуса уменьшается, что приводит к уменьшению интенсивности света.
При $\alpha \ll 1$ получается имитация мягкого, рассеянного света.
При $\alpha \gg 1$ — имитация узкого прожектора или лазера.

Источники направленного света

Направленный ИС (Directional Light).

Лучи света расположены параллельны друг другу и движутся в определенном направлении.

$$I_{\text{dir}} = I_0 \cdot \max \left(0, \frac{(L \cdot N)}{|L||N|} \right) = I_0 \cdot \max(0, \cos \phi),$$

где

I_0 — начальная интенсивность направленного источника света.

L — вектор направления света;

N — вектор нормали поверхности;

ϕ — угол между этими векторами.

Применение:

Этот ИС моделируют бесконечно удаленный источник света, такой как солнце.

Они используются для создания резких теней и подчеркивания форм объектов.

Модель Блинна-Фонга

2024-11-30

Источники направленного света

Источники направленного света

Направленный ИС (Directional Light).
Лучи света расположены параллельны друг другу и движутся в определенном направлении.

$$I_{\text{dir}} = I_0 \cdot \max \left(0, \frac{(L \cdot N)}{|L||N|} \right) = I_0 \cdot \max(0, \cos \phi),$$

где
 I_0 — начальная интенсивность направленного источника света.
 L — вектор направления света;
 N — вектор нормали поверхности;
 ϕ — угол между этими векторами.

Применение:
Этот ИС моделируют бесконечно удаленный источник света, такой как солнце.
Они используются для создания резких теней и подчеркивания форм объектов.

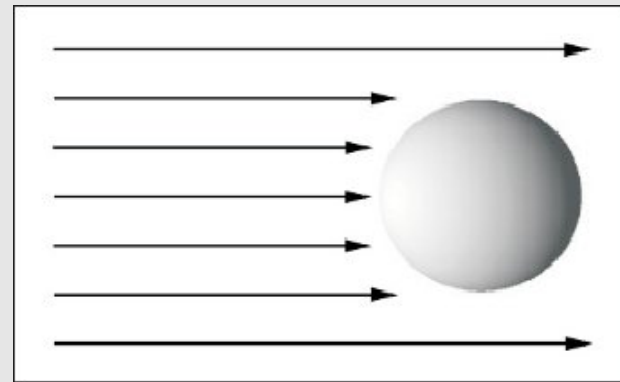


Рис. 5: Источник направленного света

Точечные ИС

Точечный ИС (Point Light) расположен в конкретной точке пространства и светит равномерно во всех направлениях.

$$I_{\text{point}} = I_0 \cdot f_r(d) \cdot \max\left(0, \frac{L \cdot N}{|L| |N|}\right),$$

где d — расстояние от точечного источника света до освещаемой точки.

Применение:

Имитация искусственного освещения, например, лампочки или фонари.

Общее освещение в сценах с несколькими точечными источниками для создания объемного света.

Моделирование огоньков или звезд в реалистичных или стилизованных сценах.

Модель Блинна-Фонга

└ Точечные ИС

Точечные ИС

Точечный ИС (Point Light) расположен в конкретной точке пространства и светит равномерно во всех направлениях.

$$I_{\text{point}} = I_0 \cdot f_r(d) \cdot \max\left(0, \frac{L \cdot N}{|L| |N|}\right),$$

где d — расстояние от точечного источника света до освещаемой точки.

Применение:

Имитация искусственного освещения, например, лампочки или фонари.

Общее освещение в сценах с несколькими точечными источниками для создания объемного света.

Моделирование огоньков или звезд в реалистичных или стилизованных сценах.

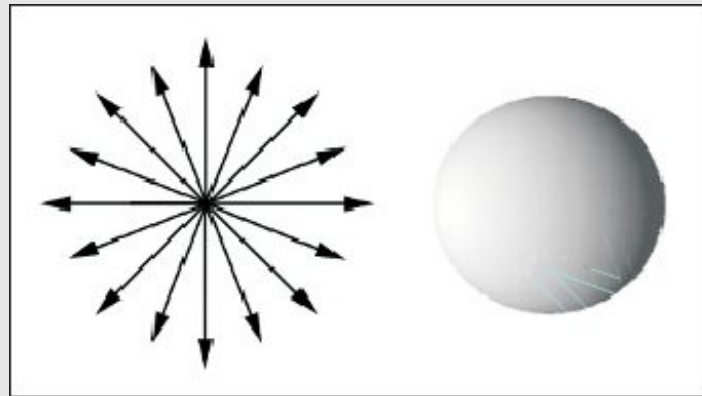


Рис. 6: Точечный ИС

Споты и прожекторы

Спот (Spot Light) или прожектор (Projector).
Является частным случаем точечного источника, но свет от него распространяется только внутри ограничивающего конуса, а не по всем направлениям.

$$I_{\text{point}} = I_0 \cdot f_r(d) \cdot f_{\alpha}^*(\theta) \cdot \max \left(0, \frac{(L \cdot N)}{|L||N|} \right),$$

где $f_{\alpha}^*(\theta) = \begin{cases} \cos^{\alpha} \theta, & \text{если } \cos \theta > \cos \theta_{\text{outer}} \\ 0, & \text{если } \cos \theta \leq \cos \theta_{\text{outer}} \end{cases}$, где $0 \leq \theta \leq \theta_{\text{outer}}$.

Применение:
Такой тип ИС эффективен для выделения конкретных объектов или областей в сцене.
Точечный ИС может имитировать направленные лучи фар автомобилей или прожекторы на сцене.

2024-11-30

Модель Блинна-Фонга

└ Споты и прожекторы

Споты и прожекторы

Спот (Spot Light) или прожектор (Projector).
Является частным случаем точечного источника, но свет от него распространяется только внутри ограничивающего конуса, а не по всем направлениям.

$$I_{\text{spot}} = I_0 \cdot f_r(d) \cdot f_{\alpha}^*(\theta) \cdot \max \left(0, \frac{(L \cdot N)}{|L||N|} \right),$$

где $f_{\alpha}^*(\theta) = \begin{cases} \cos^{\alpha} \theta, & \text{если } \cos \theta > \cos \theta_{\text{outer}} \\ 0, & \text{если } \cos \theta \leq \cos \theta_{\text{outer}} \end{cases}$, где $0 \leq \theta \leq \theta_{\text{outer}}$.

Применение:
Такой тип ИС эффективен для выделения конкретных объектов или областей в сцене.
Точечный ИС может имитировать направленные лучи фар автомобилей или прожекторы на сцене.

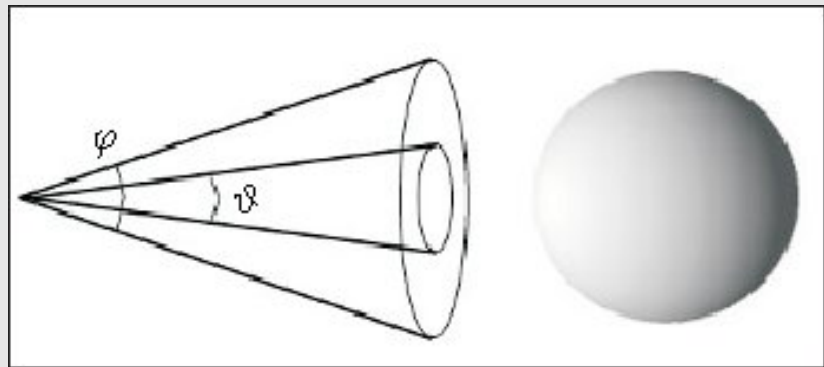


Рис. 7: Прожекторы

Когда речь идет о свойствах материала в приложении к освещению, то имеется в виду его способность воспринимать каждую из трех компонент света каждой составляющей освещенности:

k_a — свойство материала воспринимать фоновое освещение;
 k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение;
 k_s — свойство материала воспринимать зеркальное освещение.

Дополнительно, к свойствам материала добавляются еще коэффициенты:

k_e — свойство материала излучать свет;
 α — коэффициент блеска.

2024-11-30

Модель Блинна-Фонга

Свойства материала

Свойства материала

Когда речь идет о свойствах материала в приложении к освещению, то имеется в виду его способность воспринимать каждую из трех компонент света каждой составляющей освещенности:
 k_a — свойство материала воспринимать фоновое освещение;
 k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение;
 k_s — свойство материала воспринимать зеркальное освещение.

Дополнительно, к свойствам материала добавляются еще коэффициенты:
 k_e — свойство материала излучать свет;
 α — коэффициент блеска.

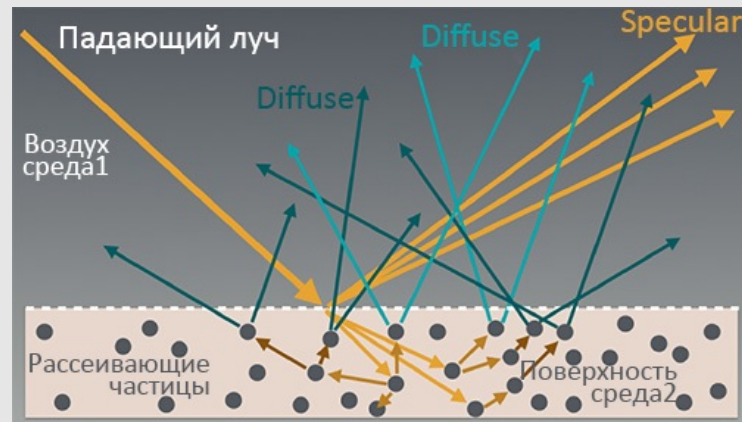


Рис. 8: Рассеивание света в материале

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Угол между отраженным лучом и направлением на наблюдателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$R + L = 2(N \cdot L)N$$

$$R = 2(N \cdot L)N - L$$

Скалярное произведение $(R \cdot V)$ рассчитывается по формуле:

$$(R \cdot V) = 2(N \cdot L)(N \cdot V) - (L \cdot V)$$

Примечание.

Формула проекции вектора L на вектор N

$$\text{Proj}_N L = \frac{(L \cdot N)}{|N|} N$$

Модель Блинна-Фонга

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Угол между отраженным лучом и направлением на наблюдателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$R + L = 2(N \cdot L)N$$

$$R = 2(N \cdot L)N - L$$

Скалярное произведение $(R \cdot V)$ рассчитывается по формуле:

$$(R \cdot V) = 2(N \cdot L)(N \cdot V) - (L \cdot V)$$

Примечание.
Формула проекции вектора L на вектор N

$$\text{Proj}_N L = \frac{(L \cdot N)}{|N|} N$$

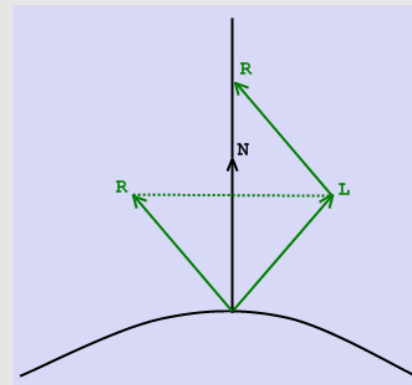


Рис. 9: Векторы в модели освещения Блинна

Фоновое освещение

Часто просто задается некое глобальное фоновое освещение всей сцены, которое можно выразить с помощью некоторой формулы

$$I = k_a I_a,$$

где
 I_a — фоновая составляющая освещенности в точке;
 k_a — коэффициент фонового освещения (свойство материала воспринимать фоновое освещение);
 I — интенсивность фонового освещения.
Примечание.
Фоновая составляющая освещенности не зависит от пространственных координат освещаемой точки и источника. Поэтому при моделировании освещения, в большинстве случаев, не имеет смысла брать более одного фонового источника света.

2024-11-30

Модель Блинна-Фонга

└ Фоновое освещение

Фоновое освещение

Часто просто задается некое глобальное фоновое освещение всей сцены, которое можно выразить с помощью некоторой формулы

$$I = k_a I_a,$$

где
 I_a — фоновая составляющая освещенности в точке;
 k_a — коэффициент фонового освещения (свойство материала воспринимать фоновое освещение);
 I — интенсивность фонового освещения.
Примечание.
Фоновая составляющая освещенности не зависит от пространственных координат освещаемой точки и источника. Поэтому при моделировании освещения, в большинстве случаев, не имеет смысла брать более одного фонового источника света.

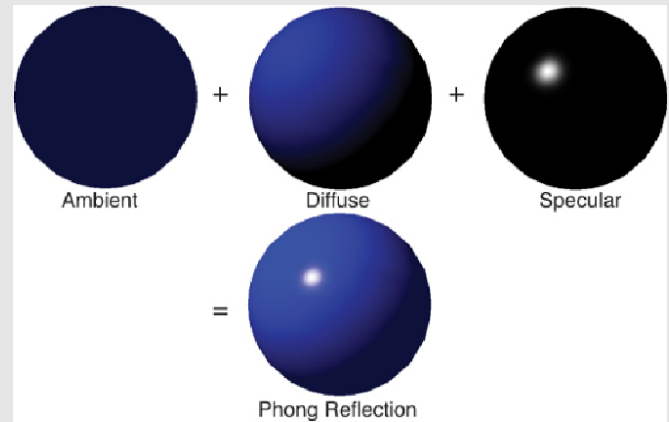


Рис. 10: Виды отражений в модели освещения Фонга

Рассеянный свет

Рассеянное освещение (Diffuse Reflection) описывает равномерное рассеивание света от поверхности во всех направлениях.
Расчетная формула имеет следующий вид:

$$I_d = k_d(L \cdot N)I_d,$$

где I_d — рассеянная составляющая освещенности в точке;
 k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение;
 I_d — мощность рассеянного освещения; L — направление из точки на источник; N — вектор нормали в точке.

Примечание.
Интенсивность рассеянного света зависит от угла между нормалью к поверхности и направлением света.

2024-11-30

Модель Блинна-Фонга

└─ Рассеянный свет

Рассеянный свет

Рассеянное освещение (Diffuse Reflection) описывает равномерное рассеивание света от поверхности во всех направлениях.
Расчетная формула имеет следующий вид:

$$I_d = k_d(L \cdot N)I_d,$$

где I_d — рассеянная составляющая освещенности в точке;
 k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение;
 I_d — мощность рассеянного освещения; L — направление из точки на источник; N — вектор нормали в точке.
Примечание.
Интенсивность рассеянного света зависит от угла между нормалью к поверхности и направлением света.

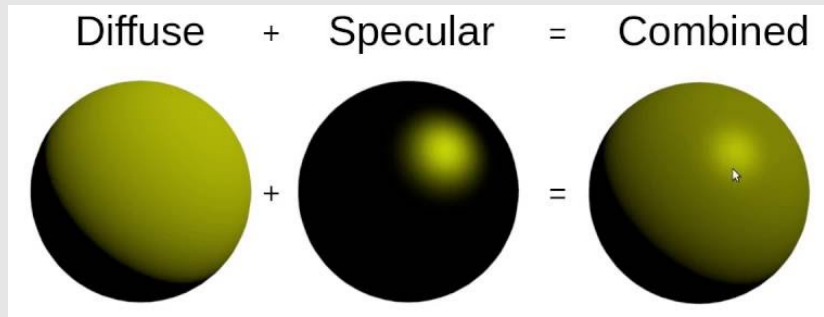


Рис. 11: Виды отражений без учета фонового освещения в модели освещения Фонга

└ Зеркальное отражение

Зеркальное отражение (Specular Reflection) моделирует отражение света от блестящих или гладких поверхностей. Этот компонент создает яркие блики на поверхности и зависит от угла между направлением обзора (направлением, с которого наблюдается поверхность) и направлением отраженного света.

$$I_s = k_s \cos^\alpha(R, V) I_s = k_s (R \cdot V)^\alpha I_s,$$

где I_s — зеркальная составляющая освещенности в точке; k_s — коэффициент зеркального отражения; I_d — мощность зеркального освещения; R — направление отраженного луча; V — направление на наблюдателя; α — коэффициент блеска, свойство материала.

Зеркальное отражение

Зеркальное отражение (Specular Reflection) моделирует отражение света от блестящих или гладких поверхностей. Этот компонент создает яркие блики на поверхности и зависит от угла между направлением обзора (направление, с которого наблюдается поверхность) и направлением отраженного света.

$$I_s = k_s \cos^\alpha(R, V) I_s = k_s (R \cdot V)^\alpha I_s,$$

где I_s — зеркальная составляющая освещенности в точке; k_s — коэффициент зеркального отражения; I_d — мощность зеркального освещения; R — направление отраженного луча; V — направление на наблюдателя; α — коэффициент блеска, свойство материала.

Именно зеркальное отражение представляет наибольший интерес, но в то же время его расчет требует больших вычислительных затрат. При фиксированном положении поверхности относительно источников света фоновая и рассеянные составляющие освещения могут быть просчитаны единожды для всей сцены, т.к. их значение не зависит от направления взгляда. С зеркальной составляющей этот фокус не сработает и придется пересчитывать её каждый раз, когда взгляд меняет свое направление.

Во всех вычислениях выше, для рассеянной и зеркальной компонент, если скалярное произведение в правой части меньше нуля, то соответствующая компонента освещенности полагается равной нулю.

Модель освещения и методы затенения

$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V)^\alpha \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность фонового излучения; k_a — коэффициент фонового отражения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска поверхности материала; N_j — нормаль в точке поверхности; L_j — вектор направления на ИС; R_j — вектор отражения ИС; V — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

Сравнение простейших методов затенения.

В методе плоского затенения освещение вычисляется один раз для каждого полигона в сцене.

В методе затенения по Фонгу для каждой вершины полигона вычисляются значения нормали и освещенности. Затем значения этих характеристик интерполируются между вершинами, чтобы получить плавное изменение освещенности на всей поверхности полигона.

Модель Блинна-Фонга

Модель освещения и методы затенения

Модель освещения и методы затенения

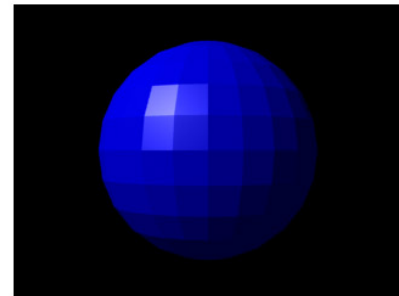
$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V)^\alpha \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность фонового излучения; k_a — коэффициент фонового отражения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска поверхности материала; N_j — нормаль в точке поверхности; L_j — вектор направления на ИС; R_j — вектор отражения ИС; V — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

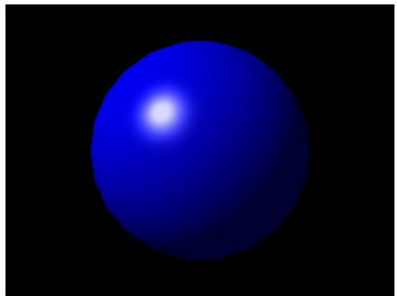
Сравнение простейших методов затенения.

В методе плоского затенения освещение вычисляется один раз для каждого полигона в сцене.

В методе затенения по Фонгу для каждой вершины полигона вычисляются значения нормали и освещенности. Затем значения этих характеристик интерполируются между вершинами, чтобы получить плавное изменение освещенности на всей поверхности полигона.



FLAT SHADING



PHONG SHADING

Рис. 12: Сравнение затенений: плоское (слева); по Фонгу (справа)

Модель освещения Блинна-Фонга

Упрощенный расчет зеркальной компоненты освещенности

Модель освещения Блинна-Фонга (1977 г.) представляет собой модель освещения Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Это позволяет сэкономить вычислительные ресурсы, что было важно даже для такой простой модели освещения.

Вычисление в каждой точке поверхности вектора полупути H (halfway vector) выполняется по следующей формуле:

$$H = \frac{L + V}{|L + V|},$$

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение.

Тогда величину $(R \cdot V)^\alpha$ можно заменить величиной $(H \cdot N)^\alpha$.

Модель Блинна-Фонга

Модель освещения Блинна-Фонга

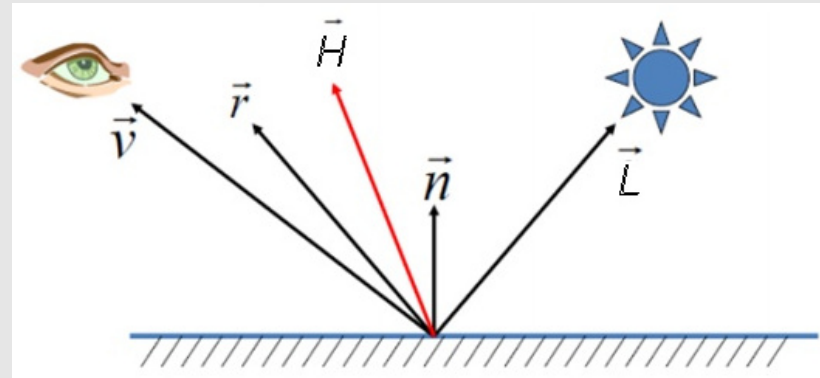


Рис. 13: Векторы в модели освещения Блинна-Фонга

Модель освещения Блинна-Фонга
Упрощенный расчет зеркальной компоненты освещенности

Модель освещения Блинна-Фонга (1977 г.) представляет собой модель освещения Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Это позволяет сэкономить вычислительные ресурсы, что было важно даже для такой простой модели освещения. Вычисление в каждой точке поверхности вектора полупути H (halfway vector) выполняется по следующей формуле:

$$H = \frac{L + V}{|L + V|},$$

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение. Тогда величину $(R \cdot V)^\alpha$ можно заменить величиной $(H \cdot N)^\alpha$.

Модель освещения Блинна-Фонга

$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (N_j \cdot H)^{\alpha_j} \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность фонового излучения; k_a — коэффициент фонового отражения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска поверхности материала; N_j — нормаль в точке поверхности; L_j — вектор направления на ИС; H — вектор полупути (halfway vector); V — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

Модель Блинна-Фонга

Модель освещения Блинна-Фонга

Модель освещения Блинна-Фонга

$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (N_j \cdot L_j) + k_s (N_j \cdot H)^{\alpha_j} \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность фонового излучения; k_a — коэффициент фонового отражения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска поверхности материала; N_j — нормаль в точке поверхности; L_j — вектор направления на ИС; H — вектор полупути (halfway vector); V — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

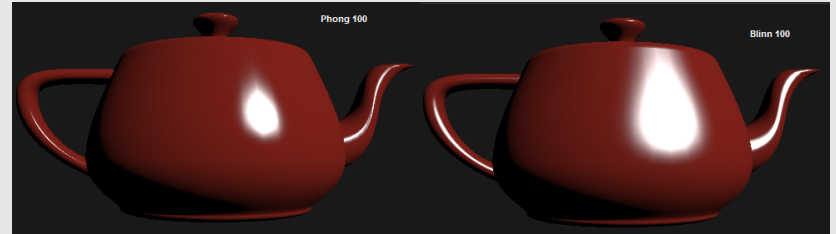


Рис. 14: Сравнение моделей Фонга и Блинна-Фонга