Радиометрия и оптика

Быковских Дмитрий Александрович

16.12.2023

4□ > 4團 > 4 = > 4 = > = 90

Радиометрия

2023-12-22

Радиометрия и оптика

Быковских Дмитрий Александрович 16.12.2023

Введение

Оптика — это раздел физики, изучающий свет и его взаимодействие с веществом, а также явления, связанные с распространением света, его преломлением, отражением, дифракцией и интерференцией. Радиометрия — это наука о измерении электромагнитного излучения в различных частях спектра, включая видимую световую область, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, радиоволны и другие формы излучения. Радиометрия описывает количественные характеристики излучения, такие как поток энергии, интенсивность и яркость, и используется в различных областях, включая астрономию, фотометрию и измерения теплового излучения.

4□ > 4□ > 4□ > 4□ > 4□ > 4□

Радиометрия

2023-

[∟]Введение

Введение

Оттом — это раздае физики, игруновций сент и но завиждейством до вществом, а тоже вклюни, секзимите с рефоргациямите сент, иг правлежениям, отрановими, дифранциям и интиференциим. Нестановкий от правочения, дифранциям и интиференциим. Различний учетоствера, включая вкучное, разрисском и другие формы изучноем. Разрисством силучное, разрисском и другие формы изучноем. Разрисством силучное, разрисском и другие формы изучноем. Разрисством силучноем, разрисском и другие формы изучноем, изичноем правочноем и предеставления и предеставления жарантерастиям изучноем, и имя имя потось жирия, интексиваем, и и зарантерастиям изучноем, и имя имя потось жирия, интексиваем, и учеством, а чеством предестановку предстановку предестановку предстановку предестановку предстановку предстановку

Геометрическая модель

В оптике энергия излучения определяется за время на много больше, чем период собственных колебаний электромагнитных волн оптического диапазона (10^{14} Γ ц).

Рассматривается простая геометрическая модель, являющаяся следствием уравнения Максвелла, согласно которой свет представляет собой поток лучистой энергии, распространяющийся вдоль геометрических лучей.

Электромагнитное поле в однородных изотропных средах переносит энергию E в направлении, которое указывается оптическим лучевым вектором q.

Радиометрия

Энергия измеряется в джоулях Дж.

Поток излучения (лучистый поток) — это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку.

$$\Phi_e = \frac{E}{t} = \frac{Дж}{c} = Вт$$

Быковских Д.А

3/18

16.12.2023

Радиометрия

2023-

Геометрическая модель

:кая модель

чем период собственных колькбаний алектромагнятных волн оптического диапазона (10¹4 Гц). Рассматривается простая геометрическая модель, являющаяся

спедствувник уражнения Максевола, согласно которой свет представлян собой поток лучистой энергии, распространяющийся ядоль геометрических лучей.
Злектроманитное поле в однородных изогропных средах переносит

Электромагнятное поле в однородных изотропных средак п энергию Е в направлении, которое указывается оптическим воктором q. Энергия измеряется в джоутих Дж.

Энергия измернется в диосулке. Дж.
Поток излучения (лучистый поток) — это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадк; Ф_в = § = 45 = 87.

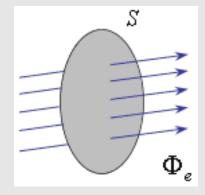


Рис. 1: Поток излучения

Геометрическая модель

Поверхностная плотность потока энергии E_e — величина потока Φ_e , приходящаяся на единицу площади S.

$$E_{e} = rac{\partial \Phi_{e}}{\partial S}, \qquad \left[rac{\mathsf{B} au}{\mathsf{M}^{2}}
ight]$$

Но также может быть наоборот.

 M_e — энергетическая светимость.

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости.

4 D > 4 D > 4 E > 4 E > E 990

Радиометрия

2023-12-22

└─ Геометрическая модель

Геометрическая модель

Повероностная плотность потока энергии E_e — величина потока Φ_e приходящаяся на единицу площади S.

$$E_{\theta} = \frac{\partial \Phi_{\theta}}{\partial S}, \left[\frac{B\tau}{\omega^2}\right]$$

Но также может быть наоборот.

М_в — энергетическая светимость.

Если поток жалучается площадкой, то поверсностная плотность потока
амергии будет иметь сынсл энергетической светимости.

$$\int E_e dS = \Phi_e$$

$$\int \int E_e dx dy = \Phi$$

Телесный угол

Solid angle

Телесный угол Ω (или твердый угол) представляет собой меру пространственного угла, измеряемого в трехмерном пространстве. Он определяется как соотношение площади проекции поверхности, заключенной между лучами, выпущенными из точки и пересекающими какой-то объект (обычно сферу), к квадрату радиуса этой сферы. Таким образом, телесный угол измеряет, насколько много пространства охватывает объект относительно точки наблюдения. Его единицей измерения является стерадиан (ср).

Радиометрия

2023-12-2

-Телесный угол

Телесный угол Solid angle

Техноский учол Т (или твердиций угол) придставляет собой меру пространственного в тремарном вператанстве об пространстве. Он пространстве или в тремарном вперопастве, и соправдяется как соотношение клющади проекции повероности, заделенненной между гумами, амигурамиными из точки и пересокающими какой то объект (обычен собыче), к квадалут радируса отой софыть. Техностий угол кващеря тумаму пространства соватывает объект отностительно точки наблюдения. Его органиций вхимуемия якляется стерафия (ср.)

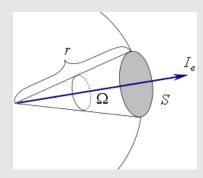


Рис. 2: Телесный угол

Угол и телесный угол

Angle and Solid Angle

Рассмотрим следующие формулы

$$d\theta = \frac{dL}{r}$$

где $d\theta$ — изменение угла θ ; dL — изменение длины дуги; r — радиус сферических координат.

Следующая формула используется при интегрировании по сферической поверхности и является результатом преобразования элемента поверхности dS в сферических координатах.

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(rd\phi)(r\sin\theta d\theta)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi,$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла; dS — элемент поверхности; r — радиус сферических координат; $d\theta$ — элемент угла θ (зенитного угла); $d\phi$ — элемент угла ϕ (азимутального угла).

Радиометрия

2023-

└─Угол и телесный угол

 $d\theta = \frac{dt}{r}$, $g = \frac{dt}{$

Угол и телесный угол

 $\alpha_{12} = \frac{1}{r^2} = \frac{1}{r^2} = \sin\theta\theta\theta\theta\phi$, где $d\Omega$ — алемент телесного угла; dS — алемент поверхности; r — радвус сферических координат; $d\theta$ — алемент угла θ (зенитного у

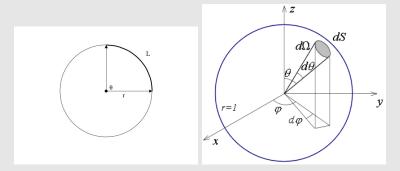


Рис. 3: Угол в полярных координатах и телесный угол в сферических координатах

Площадь сферы

Differential Solid Angles

Итак, телесный угол описывается следующей формулой

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$$

Площадь единичной сферы через телесный угол и в сферической системе координат

$$\Omega = \int_{S} d\omega = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \sin\theta d\theta d\phi = \int_{0}^{\pi} \sin\theta d\theta \int_{0}^{2\pi} d\phi = 4\pi$$

Радиометрия

2023-12-22

└─Площадь сферы

Площадь сферы Differential Solid Angles

Йтан, телесный угол описывается следующей формулой $d\omega = \frac{dS}{\pi} = \sin\theta d\theta d\phi$

Площадь единичной сферы через телесный угол и в сферическ системе координат

 $\Omega = \int_{S} d\omega = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi = \int_{0}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_{0}^{2\pi} d\phi = 4\pi$

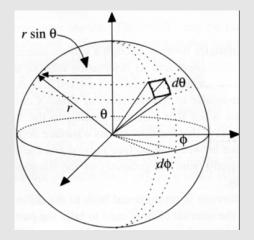


Рис. 4: Схема расчета сферы

Ракурс

Foreshortening

Большой источник, рассмотренный под косым углом, должен создавать тот же эффект, что и маленький источник, расположенный перпендикулярно. Это явление известно как ракурс.

Радиометрия

Большой источник рассиотровный год всем утом, должни сходанть тот из эффект что за за распра

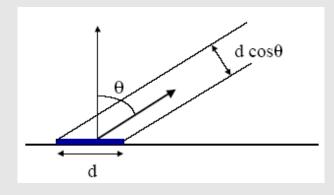


Рис. 5: Ракурс

2023-12-22

Телесный угол

Быковских Д.А.

Solid Angle

Телесный угол ω определяется проектируемой площадью поверхности на единичную сферу от точки.

Телесный угол образуется точкой и участком поверхности.

$$d\omega = dA_0 = \frac{dA\cos\theta}{r^2}$$

Радиометрия

4□ > 4ⓓ > 4ಠ > 4ಠ > 4ಠ > 5

16.12.2023

9/18

Радиометрия

2023-1

—Телесный угол

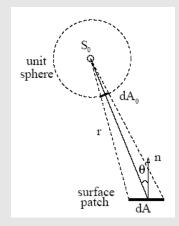


Рис. 6: Телесный угол

Излучение

Быковских Д.А

Radiance

Распределение света в пространстве зависит от положения и направления. Подходящей единицей измерения для оценки распределения света в пространстве является радианс, который определяется как мощность (количество энергии в единицу времени), перемещающаяся в какой-то точке в определенном направлении, на единицу площади, перпендикулярной направлению движения, на единицу телесного угла. Кратко говоря, радианс представляет собой количество света, излучаемого из точки... (в единичный телесный угол, с единичной площади).

Радиометрия

10 / 18

16.12.2023

Радиометрия

2023-1

-Излучение

Распрадаление света в пространстве завесит от положения и неправляеть. Подпорящей окретием дея социяствем неправляеть пределать пределать пределать пределать подращениеть как инцентору пределать пределать пределать перемещающего в какой-то точем в спорадененном инправления, за окрититу полодия, поправидуем регультать пределать по обращения пределать пределать пределать пределать обращения обращения пределать пределать пределать по соответстве сатах, а мухнаемос за точем, се архиничестве отнечестве сатах, а мухнаемос за точем, се архиничестве отнечения сатах обращения от пределать пределать пределать пределать пределать соответстве сатах домучаемос за точем, се архиничестве соответстве сатах домучаемос за точем се ответстве сатах сатах соответстве сатах сатах соответстве сатах сатах соответстве сатах сатах соответстве сатах

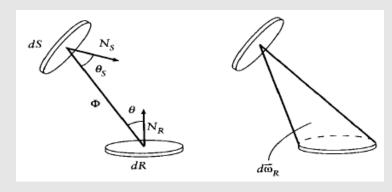


Рис. 7: Излучение из ds в dr

Формулы энергетической яркости поверхности в конкретном направлении

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta d\omega dA}$$
$$L\cos\theta d\omega = \frac{d^2\Phi}{dA}$$

где L — энергетическая яркость (Radiance), описывает количество светового потока, излучаемого поверхностью в определенном направлении, на единичную площадку и в единичный угловой диапазон $(W/(m\cdot sr))$; $d^2\Phi$ — элемент светового потока (Flux) через малую площадку dA в малом угловом диапазоне $d\omega$; $\cos\theta$ — косинус угла между нормалью к поверхности и направлением, в котором измеряется энергетическая яркость; dA — элемент площади поверхности, через которую измеряется световой поток; $d\omega$ — элемент углового диапазона, в пределах которого измеряется световой поток.

Радиометрия

Быковских Д.А

◆ロト ◆問ト ◆意ト ◆意ト 章 めなべ

11 / 18

16.12.2023

Радиометрия

2023-

Формулы анергетической яркости поверхности в конкретнов направлении $L = \frac{d^2 \Phi}{\cos \theta A \cdot d^2}$

 $\cos\theta d\omega dA$ $L\cos\theta d\omega = \frac{d^2\Phi}{dA}$

 η_B L — веретическая вресси. (Rudinica), описыват иличество систомо лотом, а упрачивного поверхностью в оприделением инпервальных, на и деритичую людирую и в церитичую людирую и в церитичую людирую (η_A) — η_A и нами и пересого потом (η_A) — η_A и нами и пересого потом (η_A) — η_A и нами и пересого и пересого, через отогорую и пересого и пересог

Бесконечно маленький источник света и участки поверхности

Radiance at x1 leaving to x2

$$L(x_1, x_1 \to x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_1 dA_1} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_2 dA_2}{r^2}\right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_2 dA_2 \cos \theta_1 dA_1}$$

Let the radiance arriving at x2 from the direction of x1 is

$$L(x_2, x_1 \to x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_2 dA_2} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_1 dA_1}{r^2} \right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_1 dA_1 \cos \theta_2 dA_2}$$



2023-1

-Бесконечно маленький источник света и участки поверхности Бесконечно маленький источник света и участки поверхности

Radiance at x1 leaving to x2

 $L(x_1, x_1 \rightarrow x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos\theta_1 dA_2} = \left[d\omega = \frac{\cos\theta_2 dA_2}{r^2}\right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos\theta_2 dA_2 \cos\theta_1}$ Let the software principle $A_1 = 0$ from the direction of A_2 is

 $L(x_0,x_1\rightarrow x_2)=\frac{d\Phi}{d\omega\cos\theta_2dA_2}=\left[d\omega-\frac{\cos\theta_1dA_1}{r^2}\right]=\frac{r^2d\Phi}{\cos\theta_1dA_1\cos\theta_2dA_2}$

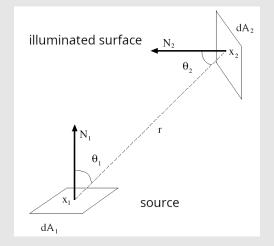


Рис. 8: Излучение из ds в dr

Расчет излученной энергии

Computing Irradiance

Интегрируйте световой поток по полусфере

$$E(x) = \int_{\Omega} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi/2} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta d\phi$$

Таким образом, излученная энергия из определенного направления составляет

$$E(x) = L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$



Радиометрия

2023-12-22

└-Расчет излученной энергии

Empropy in discose Whenevery in the correct force in the property of the $E(x) = \int_{0}^{x} L(x,\theta,\phi) \cos\theta dx = \int_{0}^{xy} \int_{0}^{x/2} L(x,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \phi d\phi$ There of places, resymments surprue as trappatement subplacement occurations: $E(x) = L(x,\theta,\phi) \cos\theta dx.$

Расчет излученной энергии

Быковских Д.А.

Радиометрия

16.12.2023

13 / 18

Двулучевая функция отражательной способности Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF

Двулучевая функция отражательной способности (ДФОС) описывает какая доля световой энергии, приходящей из одного направления, уходит в другом направлении для произвольной пары таких направлений.

Математически выражается следующим образом:

Быковских Д.А

$$f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_o, \phi_o)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$

Радиометрия

Здесь θ_i и ϕ_i представляют углы направления входящего света (обычно относительно нормали к поверхности), а θ_o и ϕ_o представляют углы направления исходящего света. BRDF является фундаментальным концептом, предоставляя способ

моделирования взаимодействия света с поверхностями и его отражения в различных направлениях.

16.12.2023 14/18

Радиометрия

2023-

-Двулучевая функция отражательной способности Двулучевая функция отражательной способности Idirectional Reflectance Distribution Function, BRDF

Двулучевая функция отражательной способности (ДФОС) описыва какая доля световой энергии, приходящей из одного направления, уходит в другом направлении для произвольной пары таких направлений.

ыражается следующим ооразом

 $f(\theta, \phi, \theta, \phi) = \frac{dL(\theta_0, \phi)}{dt}$

Здесь θ ; и ϕ ; представляют углы направления входящего света (обычно относительно нормали к поверхности), а θ_0 и ϕ_0 представляют углы направления исходящего света.

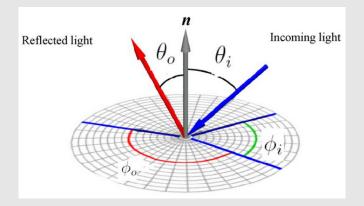


Рис. 9: Двулучевая функция отражательной способности

Излученность в направлении наблюдения при условии всех входящих световых потоков.

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = \int_{\Omega} f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

Радиометрия

Что пропорционально яркости пикселя для этого луча.

Быковских Д.А



15 / 18

16.12.2023

Радиометрия

 $L(x, \theta_0, \phi_0) = \int f_i(\theta_0, \phi_0, \theta_i, \phi_i)L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$

Функция двустороннего распределения отраженного света (BRDF) обладает несколькими важными свойствами:

- 1. Положительность: Значения BRDF обычно неотрицательны для всех углов входа и выхода света.
- 2. Нормализация: Интеграл BRDF по всем направлениям входа и выхода света равен единице. Это свойство обеспечивает сохранение энергии в системе.
- 3. Ротационная инвариантность: BRDF не зависит от ориентации координатной системы, т.е. она инвариантна относительно поворотов.
- 4. Симметрия: BRDF симметрична относительно обмена направлений входа и выхода света $(\theta_i, \phi_i \text{ и } \theta_o, \phi_o)$.
- 5. Локальная изотропия или анизотропия: BRDF может быть изотропной (не зависит от направления) или анизотропной (зависит от направления).
- 6. Монотонность: Поверхности с монотонной BRDF не могут сосредотачивать свет.
- 7. Микрогеометрическая зависимость: BRDF часто зависит от микрогеометрии поверхности (например, шероховатости или микронеровностей).

Световые и энергетические величины

Таблица 1: Сравнение энергетических и световых величин

			1		
Энергетические			Световые		
Поток излучения	Фе	Вт	Световой поток	Ф	лм
Энергетическая сила света	I _e	<u>Вт</u> ср	Сила света	1	кд
Энергетическая освещенность	E _e	<u>Вт</u> м ²	Освещенность	Ε	лк
Энергетическая светимость	M _e	<u>Вт</u> м ²	Светимость	М	<u>лм</u> м ²
Энергетическая яркость	L _e	<u>Вт</u>	Яркость	L	<u>кд</u> м ²

Примечание. Световой поток измеряется в лм (люменах) и представляет собой полную видимую энергию, излучаемую источником света за единицу времени.

Быковских Д.А.

Радиометрия 16.12.2023 16 / 18 Радиометрия

2023-

-Световые и энергетические величины

Энергетические			Световые		
Поток излучения	Фа	Вт	Световой поток	0	лм
Энергетическая сила света	I,	Br cp	Сила света	1	кд
нергетическая освещенность	E _e	By 2	Освещенность	Ε	лк
Энергетическая светимость	M_o	함	Светимость	М	AM N
Энергетическая яркость	L,	G M	Яркость	L	趋

Люмен (лм): Люмен измеряет световой поток, представляя собой общее количество света, излучаемого источником света в одну секунду; используется для оценки яркости светильников и ламп.

Кандела (кд): Кандела измеряет световой поток в заданном направлении, представляя собой интенсивность света в конкретном угловом направлении; введена для оценки яркости источников света, особенно в направленных световых системах.

Люкс (лк): Люкс измеряет освещенность, представляя собой количество света, падающего на поверхность в один люкс, равный одному люмену на квадратный метр; введен как метрика для оценки комфортного освещения.

Историческая справка. Люкс и лм стали стандартами измерения света в 20 веке, с развитием технологий освещения. В 1948 году была введена спецификация лм для измерения светового потока. Кандела была предложена в 1946 году в ходе разработки стандартов единиц измерения света, утвержденных в 1979 году.

Освещенность и светимость

Освещенность и светимость - это два различных понятия, связанных с освещением, но имеющих разные значения.

Освещенность:

Определение: Освещенность (или освещенностный поток) измеряет количество света, падающего на единичную поверхность. Единицей измерения освещенность в системе СИ является люкс $(\pi M/M^2)$.

Формула: Освещенность (E) = световой поток (Φ) / площадь поверхности (A).

Пример: Если у вас есть лампа мощностью 1000 люмен и она освещает поверхность в 10 квадратных метрах, то освещенность будет 100 люкс.

◆□▶◆□▶◆■▶◆■▶ ■ 夕○○

Радиометрия

Освещенность и светимость

Освещенность и светимость

Освещенность и светимость - это два различных понятия, свя: освещением, но имеющих разные значения.

Определения: Освещенность (или освещенностьный поток) жанеря иличество света, падающего на единичную повероность. Единиц измерения освещенности в системе СИ является лижс (m_0/w^2) . Формула: Освещенность (E) = световой поток (Φ) / глощадь-

Пример: Если у вас есть лампа мощностью 1000 люмен и она освеща поверхность в 10 квадратных метрах, то освещенность будет 100 люч

Светимость:

2023-

Определение: Светимость относится к общему количеству энергии, излучаемой световым источником во всех направлениях. Единицей измерения светимости в системе СИ является люмен (лм).

Формула: Светимость (M) - это сумма светового потока во всех направлениях.

Пример: Если у вас есть лампа, излучающая свет во все стороны, и ее световой поток составляет 1000 люмен, то ее светимость также будет 1000 люмен.

Таким образом, освещенность измеряет количество света на единицу площади, в то время как светимость представляет собой общее количество излучаемого света и измеряется в люменах.

Заключение

Литература

- Bahadir K. Gunturk Radiometry, photometric stereo
- 2 Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций
- 3 Jinxiang C. Computer Graphics: Radiometry and Illumination
- 9 Взаимосвязь силы света, светового потока и освещенности

10 > 10 > 10 > 12 > 12 > 2 990

Радиометрия

2023-12-22

-Заключение

Заключение

Bahadir K. Gunturk Radiometry, photometric stereo
 Pognonos C.A. Ocnosu ontenu. Koncnext лекций

Jinxiang C. Computer Graphics: Radiometry and Illumination

Взаимосвязь силы света, светового потока и освещенности

Быковских Д.А.

Радиометрия

16.12.2023

18 / 18