1- مقدمة

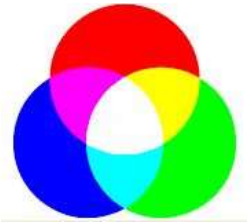
الألوان والإضاءة عنصران أساسيان في بناء المشاهد الرسومية سواء في الرسوم ثنائية البعد أو ثلاثية الأبعاد، فمن خلال التحكم في الضوء واللون، يمكن لنظام العرض أن ينقل الإحساس بالعمق، الواقعية، الملمس، والبيئة العامة للمشهد.

2- الألوان

2.1. تمثيل الألوان

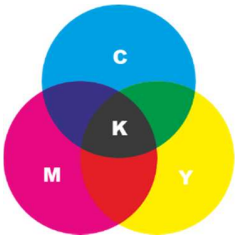
يتم تمثيل الألوان في الرسوم الحاسوبية عددياً باستخدام نماذج مختلفة، أهمها:

- نموذج RGB (Red, Green, Blue)



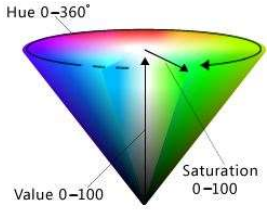
هو النموذج الأكثر استخداماً في شاشات العرض، حيث ينتج كل لون من مزيج ثلاثة ألوان (الأحمر، الأخضر، والأزرق)، يتم تمثيل اللون عادة بثلاث قيم من 0 إلى 255 في النظام الثنائي أو العشري، على سبيل المثال اللون الأبيض = 255, 255, 255.

- نموذج CMY و CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black)



وهو يعبر عن امتصاص الضوء بدلاً من إشعاعه (يمكن اعتباره نموذج طرحي)، ويستخدم هذا النموذج في الطباعة، وتوجد علاقة تقابلية بينه وبين النموذج RGB كما يلي: [C = 1 − R, M = 1 − G, Y = 1 − B]

- نموذج HSV / HSL



وهو النموذج الأكثر قرباً من طريقة تفكير الإنسان في اللون:
حيث يعبر H: Hue عن تدرّج اللون ، و S: Saturation عن الإشباع،
أما V/L فهي تعبر عن السطوع Value / Lightness .

2.2. التحويل بين النماذج اللونية

كل نموذج لوني يحلّ مشكلة معينة لا يستطيع النموذج الآخر حلها بسهولة، وبالتالي التحويل بين النماذج يسمح لنا بالانتقال من عالم الأجهزة (RGB) إلى عالم الإدراك البشري (HSV/LAB) إلى عالم الطباعة (CMYK)، سنتعرض نموذجين من نماذج التحويل اللوني.

– التحويل بين RGB و CMYK

الهدف هو تحويل الألوان من النموذج الإضافي (RGB) إلى النموذج الطرحي (CMYK) .

المدخلات : $R,G,B \in [0,1]$

المخرجات: $C,M,Y,K \in [0,1]$

الخطوات الرياضية:

$K = 1 - \max(R,G,B)$

إذا كان اللون أسود نقي

if K = 1

Return 0, 0, 0, 1

Else

نحسب القيم الطرحية

نسبة السايان (الأزرق الطرحي)

$C = (1 - r - K) / (1 - K)$

نسبة الماجنتا (الأحمر الطرحي)

$M = (1 - g - K) / (1 - K)$

نسبة الأصفر الطرحي

$Y = (1 - b - K) / (1 - K)$

Return C, M, Y, K

التحويل بين RGB و HSV

الهدف: تحويل الألوان من النموذج الإضافي (RGB) إلى النموذج الأسطواني (HSV – Hue, Saturation, Value).

المدخلات: $R,G,B \in [0,1]$

المخرجات: $H \in [0, 360°)$، $S \in [0, 1]$، $V \in [0, 1]$

الخطوات الرياضية:

حساب القيم القصوى والدنيا والفرق (Chroma)

القيمة القصوى

$M = \max(R, G, B)$

القيمة الدنيا

$m = \min(R, G, B)$

الفرق اللوني

$C = M - m$

حساب القيمة (Value) شدة اللون

```
V = M
حساب التشبع (Saturation)
if M = 0
    S = 0  اللون أسود ← لا تشبع
else
    S = C / M  نسبة الفرق اللوني إلى القيمة القصوى
حساب الصبغة (Hue)
if C = 0
    H = 0  لون رمادي ← صبغة غير معرفة
else
    if M = R
        H′ = (G − B) / C  mod 6
    else if M = G
        H′ = (B − R) / C + 2
    else if M = B
        H′ = (R − G) / C + 4
تحويل إلى درجات (°360–0)
    H = 60° × H′
إرجاع القيم
Return H, S, V
```

ما الذي نستفيده من الناحية التطبيقية في عملية التحويل اللوني؟

التحويل المستخدم	الفائدة الرئيسية	أمثلة واقعية ملموسة
RGB → HSV	تعديل اللون بشكل مستقل دون التأثير على الباقي	– تغيير لون السيارة في لعبة دون تغيير الإضاءة
RGB → CMYK	الطباعة الصحيحة (تجنب الألوان الفاقعة التي لا تُطبع)	– طباعة كتالوج منتجات بألوانه الأصلية
CMYK → RGB	إظهار ألوان الطباعة على الشاشة	– في الـ Photoshop View → Proof Colors
HSV → RGB	توليد تدرجات لونية سلسة	– مثل شريط التقدم progress bar

أشهر قواعد استخدام الألوان في التصميمات:

اللون هو أداة وظيفية قبل أن يكون أداة جمالية، يؤثر على جذب الانتباه، توصيل المشاعر والمزاج، تمييز العلامة التجارية، تحسين قابلية القراءة، تحفيز السلوك (Call to Action):

القاعدة	الشرح	أمثلة عن استخدامها
قاعدة 60-30-10	60% لون أساسي (خلفية)، 30% لون ثانوي، 10% لون مميز.	تصميمات Apple
قاعدة اللون الوحيد الدافئ	في واجهة باردة بالكامل، لون دافئ واحد فقط للعنصر الأهم	زر "اشترِ الآن" في Amazon
قاعدة التباين المعاكس (Complementary)	أزرق + برتقالي، أو أحمر + أخضر لجذب الانتباه الفوري	شعار FedEx بنفسجي + برتقالي
قاعدة الألوان المشابهة (Analogous)	ألوان متجاورة لإعطاء الإحساس بالهدوء والرقي	مواقع الرفاهية
قاعدة اللون الواحد أسود + أبيض فقط	هوية بصرية قوية بأقل مجهود	مثل شعار Duotone

3- الإضاءة

الإضاءة في رسوم الحاسوب هي عملية محاكاة لسلوك الفوتونات (أو الموجات الكهرومغناطيسية) من مصدر الضوء حتى وصولها إلى العين أو الكاميرا، مع الأخذ في بعين الاعتبار التفاعل مع المادة في كل نقطة على سطح المادة أو داخلها (المواد الشفافة).

يمكن بناء أدق النماذج ثلاثية الأبعاد وبملايين المضلعات وبأدق التفاصيل، لكن إذا كانت إضأته خاطئة، فسيظل يبدو النموذج أنه غير حقيقي، على النقيض، يمكن من خلال الإضاءة الصحيحة لمكعب بسيط أن يتحول هذا المكعب إلى معدن، أو رخام، أو ذهب ...

الإضاءة ليست مجرد "إضافة ضوء" على المشهد، وإنما هي محاكاة لسلوك الضوء الحقيقي، كيف ينبعث من الشمس أو المصباح، كيف يصطدم بالأسطح، كيف ينعكس أو ينكسر أو يُمتص أو يتشتت داخل المادة، كيف يرتد آلاف المرات بين الجدران والأرض والسقف حتى يصل أخيراً إلى عين المشاهد أو عدسة الكاميرا،

كل بكسل تراه على الشاشة هو في النهاية نتيجة لسؤال محدد: "كم من الضوء وصل إلى هذه النقطة من هذا الاتجاه بالضبط؟"

في عام 1986 حدد جيمس كاجيا معادلة رياضية دقيقة تقدم الإجابة على هذا السؤال، تُسمى Rendering Equation وممثلة بهذه الصيغة الرياضية:

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_\Omega f_r(p, \omega_i, \omega_o)\, L_i(p, \omega_i)\, (\omega_i \cdot n)\, d\omega_i$$

الرمز	المعنى
Lo	الإشعاع الخارج (الضوء الذي يصل إلى الكاميرا)
Le	الإشعاع المنبعث (مصابيح، شمس، مواد مضيئة)
fr	انعكاس المادة
Li	الإشعاع الوارد من كل الاتجاهات
(ωi·n)	قانون كوساين لامبرت

هذه المعادلة تصف بدقة تامة كل شيء: الضوء المباشر، الظلال الناعمة، انعكاسات المرايا، تشتت الضوء داخل الجلد، لمعان المحيطات، حتى الوميض داخل الماس.

لكن المشكلة أن حلها بدقة 100% يحتاج إلى سنوات من الحساب على أقوى حاسوب موجود اليوم، لذلك، كل ما نفعله في الرسوم الحاسوبية منذ أربعين سنة هو محاولة خداع العين البشرية لنقترب قدر الإمكان من الحقيقة الفيزيائية، لكن بأقل تكلفة ممكنة.

في السبعينيات والثمانينيات، كنا نكتفي بإضاءة محلية (ضوء واحد، ظلال حادة، انعكاسات بسيطة)، وكان هذا الأمر كافياً للألعاب والرسوم المتحركة القديمة، ثم جاء عصر الإضاءة الشاملة مسبقة الحساب حيث نجهز الضوء في خرائط إضاءة، ونضع Light Probes في كل ركن، وكان ذلك كافياً لصناعة الألعاب.

ثم ظهر الـ Ray Tracing في الوقت الحقيقي عام 2018، فأصبح بإمكاننا أن نرى انعكاسات حقيقية، ظلال ناعمة، إضاءة ترتد عشرات المرات، وكل ذلك في 60 إطار في الثانية الواحدة.

اليوم، في عام 2025، ندخل عصراً جديداً هو الإضاءة العصبية، أو متعددة الأطياف، وهي الإضاءة التي لا تحتاج إلى معرفة الفيزياء مسبقاً لأن الشبكة العصبية تتعلّمها من الصور الحقيقية.

1. الإضاءة المحلية Local Illumination

فكرتها الأساسية أن نحسب الضوء في كل نقطة على السطح من مصادر الضوء المباشرة فقط ، وتتجاهل أي ضوء يأتي بعد ارتداده من سطح آخر.

في هذا النوع من الإضاءة نحسب:

- الضوء المباشر من المصابيح أو الشمس Direct Lighting
- الانعكاس اللامع Specular والمنتشر Diffuse على السطح نفسه
- الظلال الحادة فقط Hard Shadows

ما يتم تجاهله:

- الضوء المرتد (مثلا ضوء مرتد من أرض حمراء فيجعل الجدار الأبيض مائلاً للحمرة)
- الظلال الناعمة في يوم غائم
- الانعكاسات في المرايا أو الأرضيات اللامعة

من الأمثلة عن هذا النوع من الإضاءة: الألعاب التي تم تطويرها قبل عام 2005 مثل لعبة Doom هذا النوع من الإضاءة سريع ولا يحتاج إلى موارد حاسوبية إلا أنه لا يبدو حقيقياً و تبدو المشاهد فيه كأنها بلاستيكية مسطحة لا عمق لها.

2. الإضاءة الشاملة مسبقة الحساب Precomputed Global ILLUMINATION

فكرتها الأساسية أن نحسب الإضاءة غير المباشرة مسبقاً قبل تشغيل اللعبة أو الفلم ونخزنها في خرائط أو قاعدة بيانات صغيرة، من أشهر التقنيات التي تدعم هذا النوع:

- خرائط إضاءة الأسطح Lightmaps
- نقاط الإضاءة Light Probes

في هذا النوع من الإضاءة نحسب:

- اللون المنتشر من جدار إلى آخر Color Bleeding
- الظلال الناعمة تقريبياً

- الإضاءة غير المباشرة (المرتدة) من 3 إلى 5 ارتدادات

ما يتم تجاهله:

- التغيير في الإضاءة أثناء التشغيل (مثلاً فتح باب أو كسر جدار) فإن الإضاءة لا تتغير .
- الانعكاسات اللامعة الحقيقية.
- تركيز الضوء تحت الماء أو في الكأس.

من الأمثلة عن هذا النوع من الإضاءة معظم ألعاب ما بين 2010–2022 (God of War 2018)

يتميز هذا النوع من الإضاءة بالجودة العالية والأداء الممتاز، إلا أنها لا تتفاعل مع التغييرات الديناميكية.

3. الإضاءة الشاملة في الوقت الحقيقي Real-time Global ILLUMINATION

فكرتها الأساسية أن نحسب الإضاءة غير المباشرة أثناء التشغيل، في كل إطار، مع دعم التغييرات الديناميكية، من أشهر التقنيات التي تستخدم هذا النوع من الإضاءة:

- NVIDIA RTXGI
- Unity Ray Tracing

في هذا النوع نحسب:

- إضاءة غير مباشرة ديناميكية تتغير مع الأحداث (كسر جدار، إطفاء مصباح).
- الظلال الناعمة الديناميكية
- الإنعكاسات اللامعة الحقيقية Ray-traced

ما يزال هذ االنموذج محدود بـ :

- عدد الارتدادات (عادة ما تكون بين 2–4 فقط) .
- الضوضاء لا تزال موجودة في المشاهد المعقدة.
- التأثير البصري الناتج عن تركيز الضوء بسبب الانعكاس أو الانكسار عبر الأسطح المنحنية، مثل الأنماط المتلألئة التي نراها في قاع حوض السباحة لا تزال شبه مستحيلة في الوقت الحقيقي بدقة عالية.

من الأمثلة عن هذا النوع من الإضاءة، لعبة Avatar of Pandora

تعتبر هذه الإضاءة الأقرب للواقع مع أداء مقبول مع عدد اطارت 60–120 ، إلا انها تحتاج بطاقات رسومية قوية جداً (كرت شاشة).

4. الإضاءة الشاملة غير المتحيزة Path Tracing Unbiased Global Illumination

فكرتها الأساسية أنها تتبع مسار كل فوتون بشكل عشوائي تماماً حتى يصل إلى الكاميرا، بدون أي تقريب أو خداع، وتكون النتيجة صحيحة فيزيائياً 100% عندما نأخذ عينات لانهائية باستخدام معادلة Kajiya .

يتميز هذا النوع من الإضاءة بأنه واقعي بلا حدود ويدعم الظواهر المعقدة مثل (الانعكاس أو الانكسار، انتشار الضوء تحت السطح) إلا أن معالجتها بطيئة جداً (دقائق إلى ساعات لكل إطار)، وهي غير عملية للألعاب.

من أهم الأدوات المستخدمة: Blender Cycles ، و Disney's Hyperion المستخدم في أفلام ديزني.

من الأمثلة عن هذا النوع من الإضاءة أفلام الرسوم المتحركة الحديثة مثل فلم (قلباً وقالباً Inside Out)

5. الإضاءة العصبية Neural Lighting / Neural Radiance Fields

فكرتها الأساسية هي الإنتقال من "المعادلات الفيزيائية" إلى "الدوال العصبية"

في كل تقنيات الإضاءة التقليدية من Phong إلى Path Tracing، نكتب معادلات صريحة لوصف (كيف ينعكس الضوء ، كيف يخترق المادة ، كيف يتشتت في الفضاء أو الأجسام).

أما في الإضاءة العصبية، نستبدل كل هذه المعادلات بشبكة عصبية صغيرة MLP تقوم بمهمة واحدة فقط:

نعطيها إحداثيات نقطة في الفضاء x,y,z مع اتجاه الرؤية φ وتعيد لنا :

- الكثافة σ density
- اللون أو الإشعاع RGB أو spectral
- خصائص المادة: roughness, metallic…

أي أن المشهد بأكمله والإضاءة والمادة أصبحت دالة مستمرة عصبية.

بمعنى آخر بدل من أن نحسب الإضاءة باستخدام معادلات فيزيائية، نحلها بشبكة عصبية تتعلّم الكثافة واللون من الصور الحقيقية.

5.1. من النماذج العصبية الشهيرة Neural Radiance Fields (NeRF)

فكرتها الأساسية أنها تأخذ الصور (مع أوضاع الكاميرا)، وتُدرّب شبكة عصبية صغيرة (MLP) لتتعلم الإجابة على السؤال التالي: "إذا وقفت في أي مكان في الفضاء، ونظرت في أي اتجاه، ماذا سترى بالضبط؟"

بعد التدريب، تتمكن هذه الشبكة من تمثيل المشهد بشكل ثلاثي الأبعاد: (شكل دقيق ، ألوان دقيقة، إضاءة واقعية، ظلال ناعمة، انعكاسات، شفافية، وحتى الضوء الذي يخترق الجلد أو الزجاج)، كل ذلك بدون الحاجة لمضلعات أو خرائط لونية وبدون أي تدخل يدوي.

المدخلات:

- مجموعة صور (50–300 صورة عادة)
- أوضاع الكاميرا (Camera Poses)

المخرجات:

- دالة مستمرة $f_\theta(x, y, z, \theta, \varphi) \rightarrow (r, g, b, \sigma)$
  - (x,y,z) نقطة في الفضاء
  - (θ,φ) اتجاه النظر (direction)
  - (r,g,b) اللون
  - σ الكثافة (density) أي كثافة المادة في هذه النقطة.

نقاط القوة:

1. جودة لا نهائية تقريباً ، فكلما زادت العينات زادت الدقة .
2. ظواهر فيزيائية تظهر بشكل تلقائي (انعكاسات زجاجية، ظلال ناعمة، تشتت تحت السطحي مثل الشمع، ضوء يخترق الضباب أو الدخان)
3. لا تحتاج إلا لصور عادية (ممكن صور جوال قديم)

نقاط الضعف:

1. بطيء جداً في التدريب والرسم (ساعات للتدريب)
2. لا يمكن تعديله يدوياً بسهولة (حيث لا توجد مضلعات)
3. حجم التخزين متوسط لكن الرسم بطيء
4. يعاني من الضوضاء في المناطق الفارغة

6. الرذاذ الغاوسي ثلاثي الأبعاد 3D Gaussian Splatting

وهي التقنية التي أنهت عصر NeRF الكلاسيكي عملياً ، فكرتها الأساسية بدل من أن نمثل المشهد بشبكة عصبية مستمرة (NeRF) أو مضلعات أو نقاط عادية ...

نقول أن العالم كله عبارة عن سحابة من ملايين "الكرات الغاوسية ثلاثية الأبعاد" الصغيرة جداً والمتداخلة، الشبه شفافة، و كل واحدة لها:

- مركز في الفضاء (x, y, z)
- حجم وشكل واتجاه (مصفوفة تغاير 3×3)
- لون يُخزن كـ Spherical Harmonics
- شفافية (opacity)
- خصائص مادة metallic

عندما نريد رسم الصورة، نُسقط كل هذه الكرات على الشاشة فتصبح بيضاويات ثنائية الأبعاد، ثم نرسمها طبقة طبقة من الخلف إلى الأمام مثل رذاذ الطلاء، ومن هنا جاء الاسم.

خوارزمية تدريب هذا النموذج

1. تبدأ بصور متعددة الزوايا مع أوضاع مختلفة للكاميرا .
2. تنشئ Point Cloud أولية (مثلاً 100 ألف نقطة).
3. تحول كل نقطة إلى Gaussian صغير جداً (حجم عشوائي صغير + شفافية منخفضة).
4. تبدأ بعملية التحسين (المواقع، الأحجام، الدوران، الألوان ، الشفافية) (عادة 30,000 خطوة).
5. كل 100–300 خطوة نجري تحكم كيفي في الكثافة Adaptive Density Control
   - إذا كان التدرج كبير جداً نقسم الـ Gaussian إلى اثنين Split
   - إذا كان صغير جداً أو شفافيته قريبة من الصفر، تحذفه

بعد التدريب 10–90 ثا، نحصل على مشهد ثلاثي الأبعاد بإضاءة واقعية 100% قابل للدوران 360 درجة

لماذا تفوق الرذاذ الغاوسي ثلاثي الأبعاد على NeRF ؟

#	NeRF	3D Gaussian Splatting
وقت التدريب	6–48 ساعة	8–90 ثانية فقط
سرعة الرسم	10–120 إطار في ثانية	200–3000 إطار في الثانية
الجودة البصرية	جيدة لكن فيها ضوضاء	أنظف، أكثر حدة، لا ضوضاء تقريباً
التحكم والتعديل	شبه مستحيل	سهل جداً (نحذف، نضيف، نعدل الكرات)
حجم الملف	100–5 ميجا بايت	100ميجا – 4 جيجا بايت
الإضاءة الديناميكية	ضعيف جداً	ممتاز (مع الإصدارات الحديثة)