

Illusztráció: Vass Gergely

Tökéletes tükröződések a 3D grafikában

A következőkben a fotorealistikus számítógépes grafikában használt, a tükröződésekkel kapcsolatos legfontosabb eljárásokat és módszereket járjuk körbe.



Mielőtt a gyakorlati alkalmazásokkal foglalkoznánk, tisztázzuk, hogy pontosan miért is van szükségünk

ezekre a technikákra. Hogy erre választ kapjunk, áttekintjük a képszintézis (render) során használt algoritmusokat és modelleket. A számítógépes

fotorealistikus megjelenítés lényege, hogy a generált kép nehezen – vagy egyáltalán ne – legyen megkülönböztethető egy valódi fényképtől.

Hogy a valóságban létrejövő képeket sikeresen tudjuk reprodukálni, meg kell vizsgálnunk, hogyan jönnek létre szemünkben (agyunkban) a képek.

Az emberi látás a környezetből a retinánkra fókuszált elektromágneses hullámok egy meghatározott tartományán alapszik. Vagyis ha egy felületet látunk, akkor onnan fény jut a szemünkbe. Ez alapvetően két módon lehetséges:

- a tárgy fényt bocsát ki,
- a tárgy felülete szemünk irányába veri vissza a valamely más irányból érkező sugarakat.

Az első eset számítógépes szimulációja nem okoz gondot, a második viszont annál inkább. A felületekről a szemünkbe (a virtuális kamerába) visszaverődő fény meghatározása igen nehéz, hiszen rengeteg fizikai tényező befolyásolja azt:

- Meg kell állapítani az adott felület-elemre, hogy a tér különböző irányából milyen erősségű és milyen frekvenciájú fény érkezik.
- Meg kell határozni az adott felület-elem sugárzását a kamera irányába, a különböző irányokból érkező sugárzások alapján.

Ez a probléma megfogalmazható impozáns matematikai egyenletek formájában, de a kiértékelése még számítógépekkel sem egyszerű. (Gondoljuk végig: egy felület sugárzása befolyásolja a másik felület sugárzását, ami viszont szintén befolyásolja az első felület sugárzását és így tovább). Hogy a renderelés gyorsabb és egyszerűbb legyen, nem árt bizonyos egyszerűsítéseket alkalmaznunk. A gyorsaság és valóságosság alapján az alábbi két „véglet” létezik a

rendelkezésre álló (és használt) technikák körében:

- **Globális illuminációs algoritmusok:** Gyakorlatilag nincsen egyszerűsítés, a nagyon lassú számítás eredménye maximális élethűség.
- **Lokális illuminációs algoritmusok:** Drasztikus egyszerűsítés, csak a fényforrásokból érkező fényt veszi figyelembe a testek árnyalásánál. Nem törődünk a többi testről visszavert fénnel.

A legtöbb szoftvercsomag lokális illuminációs algoritmust használ egy kis *sugárkövetéssel* feljavítva, ami lehetővé teszi az ideális visszaverődések számítását. Ez azt jelenti, hogy ha egy felület ideálisan tükröző felület (nem szórja a fényt), akkor képes a programunk a többi testet megjeleníteni a tükröződésben. Innentől kezdve tehát élünk azzal a feltételezéssel, hogy szoftverünk nem képes a testekről visszavert fényt figyelembe venni az árnyalásnál, kivéve a tökéletes tükröződést.

Természetesen azzal, hogy megfedkedtünk a testekről visszaverődő fényről, jelentősen könnyítettük a dolgunkat. De sajnos a közvetlenül fényforrásokból érkező fény visszaverődésének számítása sem egyszerű feladat, hiszen a különböző anyagok a beérkező fényt különböző módon verik vissza. Az anyagok ezen tulajdonságát az ún. *BRDF (Bi-directional Reflection Distribution Function)* írja le.

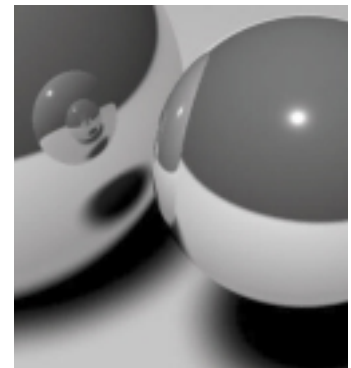
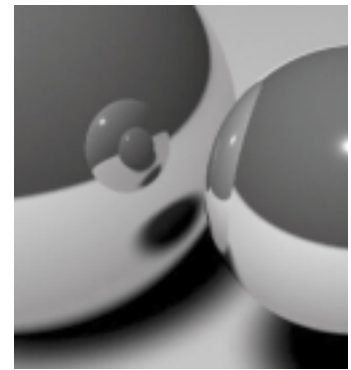
Illuminációs modellek

A valóságban az anyagok fényvisszaverési tulajdonsága a fenti tulajdonságok keverékéből áll. Természetesen vannak kivételek (pl. a gyöngyházfényezett felületek, szőr, toll...). Ahhoz, hogy tökéletesen le tudjuk írni az anyagok visszaverési tulajdonságait, minden frekvenciára (színre) meg kellene adnunk a BRDF tulajdonságot. Lehet például olyan anyag, amely a piros színt tökéletesen visszaveri, de a zöldet szétszórja. A napjainkban használt programok számára elégséges az RGB színekre vonatkozó visszaverési tulajdonságok megadása, sőt vannak olyan tulajdonságok is, amelyeket nem tudunk a három alapszínre külön-külön meghatározni.

A különböző szoftvercsomagok 5-10 „material”-t (anyagot) szoktak felkínálni a felületek megjelenésének jellemzésére, amelyek különböző ún. *illuminációs modelleket* takarnak. Ezen modellek alapvetően abban különböznek, hogy a fent részletezett visszaverési tulajdonságokat hogyan ötvözik:

- **Ambient modell:** A beeső fényt egyáltalán nem veszi figyelembe, minden pontot a felületen ugyanazzal az ún. ambiens fénnel árnyal. Ekkor gyakorlatilag sugároz (világít) az anyag.
- **Lambert modell:** Az előzőeken túl a beeső fény alapján a diffúz fényvisszaverést is tartalmazza.
- **Phong modell:** Ebben a modellben a spekuláris visszaverés is megjelenik, így csillanások jönnek létre a felületen.
- **Blinn:** Hasonló mint a phong modell, de a spekuláris visszaverődés a geometria függvényében változhat, így valóságosabb, finomabb csillanások érhetők el.

Azok a lokális illuminációs algoritmusok, amelyek a fenti modelleket alkalmazzák és a render során csupán a fényforrásokból érkező fényeket veszik figyelembe, mindenképpen „lebuknak” a csillogó tárgyak megjelenítésekor. Ezeknél az anyagoknál ugyanis megszoktuk, hogy látjuk a környezetet a felület tükröződésében. A diffúz anyagoknál szerencsére sokkal kisebb jelentőségű a környezetből érkező fény, hiszen a fényforrások (nap, lámpa, tűz) fénye elnyomja azt. Hogy a fent leírt csorbát kiküszörüljék a programok, a korábban említett ún. rekurzív sugárkövetéses algoritmust használják csillogó felületek esetében. Ennek hiányossága, hogy csak az ideális tükröződést kezeli. A módszer lényege, hogy a tükröző felület minden pontjából a tükröződésnek megfelelő irányba tekintünk, és kiszámítjuk, hogy milyen színű pont látszik ebben a tükrözött irányban. Vagyis a szemünkből egy „sugarat”



A képeken két tükröző gömb látható. A visszaverődések beállított száma 2, ill. 10.

bocsátunk a felületre, és ha ez a sugár visszaverődik (akár többször is) követjük az útját, és rögzítjük, hogy milyen színű pontban ér véget. Így megkaptuk, hogy mi látszik a többszörös tükröződésben. Azért nevezzük ezt az eljárást rekurzívnak, mert minden esetben, amikor „tekintünk sugara” visszaverődik egy felületről, ugyanazt az algoritmust hívjuk meg újra és újra. Általában paraméterként adható meg, hogy hány visszaverődést kezeljen a program. (Ha nem adnánk meg, könnyen végtelen tükröződésnek számításába bonyolódna.)

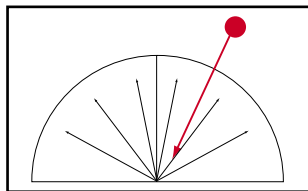
A rekurzív sugárkövetés nagyon számításgényes eljárás, és vannak olyan esetek, amikor nem is alkalmazható (pl. ha nem modelleztük le a környezetet, hanem egy adott fényképhez szeretnénk a tükröző modellünket beilleszteni). Ilyen esetekben alkalmazhatjuk az ún. *reflection mapping* eljárást. Ennek lényege, hogy mi mondjuk meg, hogy mi látszódjon a tükröződésben, és nem bízunk a számítógépre ennek kiszámítását. A tér minden irányához egy színt kell rendelnünk, vagyis meg kell mondanunk, hogy egy adott pontból hogyan néz ki a környezet. Így a számítógép a felület kamerához viszonyított helyzetéből könnyedén számítja a tükrözött képet.

A *reflection map* megadásának több módja is elterjedt. Ezek lényege, hogy

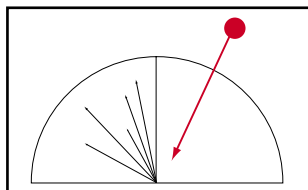
BRDF modellek

Alapvető, számunkra érdekes BRDF modellek:

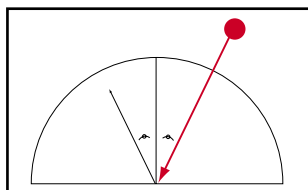
- 1 **Diffúz anyagok** a beérkező fényt minden irányba egyenletesen szétszórják, vagyis a felület színe nem függ a nézőponttól. Ez az ún. diffúz fényvisszaverés. Ilyen típusú anyagok a meszelt fal, a ping-pong labda vagy a homok.



- 2 A spekuláris visszaverődés, más néven *specular reflection* jellemzője, hogy a beeső fény nagy hányadát az ideális tükröződési irányba veri vissza, így csillanások jönnek létre a felületen. Ilyen anyagok: csillogó műanyagok, fémek, bőr felületek.



- 3 Az ideális tükrözés (*total reflection*) jellemzője, hogy csak a visszaverődési törvény szerinti irányba történik fényvisszaverés, így a felület tökéletesen tükrökléte viselkedik. Természetesen a beérkező fény egy részét elnyeli a felület, ezt a *Fresnel együtthatóval* szokták megadni.



egy tetszőleges térbeli irányhoz a megadott textúra egy pixelét rendel. Másképpen fogalmazva az egységgömb minden U és V paraméterekkel jellemzett pontjához (vagyis egy térbeli irányhoz) kell a 2D-s textúrának egy (X,Y) pontját rendelni. Ez messze nem triviális feladat, egy teljesen hasonló probléma már régóta megkeseríti a térképészek életét.

Nem lehet ugyanis olyan sík térképet készíteni a Földről, amelyen minden egyenlő nagyságú darabka szintén egyenlő nagyságú területet reprezentál a bolygó felszínén. Gondoljunk csak az atlaszokban látható téglalap alakú földtérképekre. Az egyenlítőtől a sarkvidékek felé egyre torzabbak az arányok. A *reflection map* megadása is hasonló probléma: egy téglalap alakú térképet kell megfeleltetnünk egy gömb felszínének.

Reflection map technikák

A legerjedtebb technikák a *reflection map* megadására a következők:

• Kocka oldalainak perspektivikus vetítése

Ez a technika a „téglatest” formájú terek reprezentálására a legalkalmasabb. 6 textúrát kell egy kocka 6 oldalának megfeleltetni. A környezetet ez a „végtelenül nagy” kocka fogja reprezentálni. Itt a torzulást a kocka éleinél tapasztalhatjuk, hiszen ezeken a helyeken élesebb szögben látjuk a felületet.



Perspektivikus vetítés: Egy szoba falait használjuk textúráként, vagyis a környezet egy végtelenül nagy szoba lesz



A tükröződés egy gömb felületén a fenti fényképek alapján

Használhatunk fényképeket vagy általunk készített textúrákat is. Szobák vagy termek falai viszonylag egyszerűen lefotózhatóak, csupán a túlzott perspektivikus torzulástól kell óvakodnunk. A nem „kocka” formájú terekről készített fotóknál nem garantált a siker, de szép eredményeket érhetünk el.

A textúrák festése sem okozhat gondot, csupán a határoló éleknél kell ügyelnünk a folytonosságra. Gyakorlatilag ez a technika az egyik legkényelmesebb, ha mi akarjuk megfesteni a *reflection map*-et.

• Polár koordinátás megfeleltetés

A textúrát úgy feszítjük rá az egységgömbre, hogy az Y, illetve X koordináták a szélességnek, illetve hosszúságnak feleljenek meg (polár koordináták szerint). Vagyis a teret egy végtelenül nagy gömb reprezentálja, a textúrát pedig úgy feszítjük rá, mint a jól ismert téglalap alakú térképet a földgolyóra. Hibája, hogy az északi és déli sarkoknál nagyon sűrűk a pontok. Fényképezéssel nem tudunk előállítani ilyen célra tökéletes textúrát, de festeni jól tudunk.

• Gömbtükrös módszer

Ennek a technikának nem alakult ki egyértelmű magyar elnevezése, a Maya terminológia *Ball Environment Map*-ként azonosítja. Ez a módszer teszi lehetővé, hogy egy nagyon egyszerű fényképezési technikával rögzítsük a környezet képét, és ezt használjuk a tükröződések számításánál. Nincs másra szükségünk, mint egy tükröző gömb alakú testre, és egy fényképezőgépre. Ha ugyanis a tükörgömböt egy tetszőleges helyen lefényképezzük, jó közelítéssel megkapjuk, hogy a tér különböző irányából milyen fény érkezik az adott pontba.

A teret tehát egy végtelenül nagy gömb reprezentálja, ahol a textúrát egy gömbtükrös fotó kell, hogy adja. Ha csupán egy fényképet használunk, a következők nem elhanyagolható hibákra kell figyelnünk:

- A tér azon részéről, amelyet a gömb kitakar, egyáltalán nem kapunk információt. Ezt a hibát úgy tudjuk minimalizálni, hogy messze megyünk a gömbtől, vagy kicsi gömböt használunk.
- A tér azon része, amely a gömb oldalán éles szögben látszik (a gömbhöz képest távolabb esik), igen rossz minőségben fog a képen megjelenni.

A fenti okokból célszerű több fénykép kombinációját alkalmazni, így akár a fotóstól is „megszabadulhatunk” anélkül, hogy kézzel kellene kiretusálnunk a felvételekből.



Fent: A felhasznált kép jobb és bal széle nem illeszkedik, a tetején és az alján nincs „széthúzza” a kép, így biztosan nem lesz tökéletes a tükröződés.

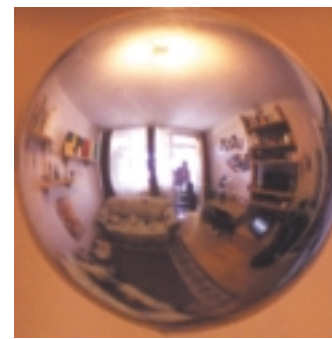
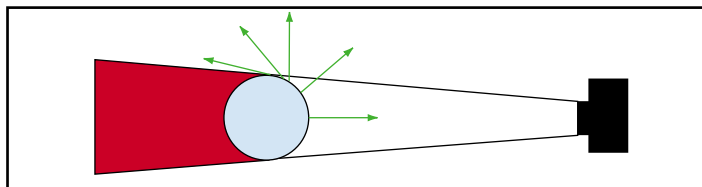
Jobbra: A polár koordinátás megfeleltetésnél a hibák szembetűnők, de kis igazítással minimalizálhatóak: élesen kirajzolódik a határvonal, ahol a kép két oldala összeér, és a gömb tetején ill. alján egy pontban húzódik össze a kép.

Környezet textúrázása

A *reflection map*-ek alkalmazása a gyakorlatban néha kényelmetlen, vagy nem célravezető. Például előfordulhat, hogy a környezetről a fenti módon megszerzett információt arra szeretnénk használni, hogy egy virtuális „szobát” feltextúrázzunk. Így az absztrakt *reflection map* helyett egy valódi szobába illeszthetjük az általunk készített objektumokat, aminek kényelmi



szempontok mellett más igen komoly előnyei lehetnek. Ha például a fenti szobáról készített fényképeket megfelelő módon rávetítjük egy téglatestre, akkor olyan animációt is készíthetünk, ahol a csillogó test mozog. Ekkor ugyanis a tükröződések a mozgásnak megfelelően el fognak mozdulni a testen, ami a *reflection mapping* technikával nem megoldható, hiszen ott a teret egy végtelenül nagy gömb reprezentálja.



Legfelül: Gömbtükrös módszer vázlata

Középen: A két kép ugyan azon szoba két ellentétes pontjából készült: a két fotó felhasználásával elkészíthető a teljes szoba tükröződése úgy, hogy nem lesznek kritikusan rossz felbontású részek. Látható, hogy a fotós mindkét fotóról átkerült a végeredménybe, de természetesen több kép segítségével akár a kép készítőjét és a fényképezőgépet is eltüntethetjük retusálás nélkül.

Balra: Az itt látható, gömbtükrös módszerrel készített kép mindkét eredeti felvétélhez képest kb. 90 fokkal elforgatott tükröződést mutat.



A két képen a szobáról készült gömbtükrös kép alapján feltextúrázott téglatestek láthatóak.

Fent: mennyezet és 2 fal

Lent: padló és 2 szemközti fal

Mint a képeken látható, ez a technika nem igazán alkalmas arra, hogy korrektül textúrázzunk 3D modelleket, bár ténylegesen téglatest alakú helyiségekről készült, nagyon jó felbontású gömbtükrös fényképek alapján meglepően jó eredmények érhetőek el. A tükröződések számításához azonban bőven elég ilyen minőségű textúra. A fenti képeken több olyan hibát is megfigyelhetünk, ami könnyen elkerülhető. A szőnyeg szélén például látszik, hogy a két kép határán van egy kis elcsúszás. Ennek két oka van: sajnos nem volt tökéletesen gömb alakú felhasznált tükrő, másrészt nem pontosan egymással szemből készülték a képek. Így a gömbtükrő torzulása máshogy torzította a két „fél-teret”. A másik észrevehető hiba szintén egy pusztán technikai hibából ered: az ablakkal szemközti pozícióból készült képen a gömb mögött behúztam a függőnyt – gondolván úgyszintén a másik képen szereplő ablakot fogom használni... Ez a megoldás sajnos megváltoztatta a fényviszonyokat a szobában, így a fenti képen a szoba két fele kicsit máshogy van bevilágítva (ez a szőnyegen különösen látszik). Mindezen hibák ellenére tökéletesen használható lett az eredmény a valódi tükröződések szimulálásához. A geometriára vetített képek tükröződésben való megjelenéséhez a

szoftverünk sugárkövetéses algoritmusát (*raytracing*) kell igénybe vennünk, ami – ne felejtjük el – lassúbb, mint a *reflection map* alapján számított tükröződés. Csak akkor használjuk, ha valóban szükséges.

Most, hogy tisztáztuk a *reflection map* megadásának módozatait, említünk meg egy kicsit haladóbb alkalmazását is. Eddig csak és kizárólag a tökéletes reflexióval foglalkoztunk, hiszen ennek a létrehozására találták ki a sugárkövetést és a *reflection mapping* technikákat. Ennek ellenére a spekuláris visszaverődés, sőt a diffúz visszaverődés izgalmasabbá tételére is alkalmasak lehetnek. Gondoljunk csak bele ennek a lehetőségeibe: ha a *reflection mapping*, vagy a *raytracing* technika segítségével az összes alapvető visszaverődési tulajdonságot kezelni tudnánk (vagyis nem csak tökéletes reflexiót, hanem spekuláris és diffúz visszaverődéseket is), akkor a rendelkezésre álló eszközeinkkel akár *globális illuminációs problémákat* is meg tudnánk oldani. Vagyis kezelni tudnánk a testek felszínéről visszaverődő fényt is a megvilágításnál. Vegyük tehát ismét sorra az alapvető visszaverődési fajtákat:

- **Tökéletes visszaverődés:** Semmi trükkre nincs szükség, hiszen pont erre találták ki a fenti két technikát.
- **Diffúz visszaverődés:** Olyan sűrű, érdes felületet kell létrehozni, hogy a felület minden pontja minden irányba verjen vissza fényt.
- **Spekuláris visszaverődés:** Olyan felületre van szükségünk, ahol „nagy valószínűséggel” a tökéletes visszaverődés irányába tükröződik a fény, vagy kissé érdes anyagot kell választanunk.

Ha tehát az összes anyagunk színét a tükröződések alapján számítanánk ki (a fenti domborzatok felhasználásával), akkor nem is lenne szükségünk az

absztrakt fényforrásainkra, hiszen a felületről felületre verődő tükröződések a valódi, fizikai törvényeknek megfelelően világítanak meg az objektumainkat.

Természetesen nincs olyan szerencsénk, hogy meg tudnánk valósítani a fentebb vázolt víziót. Ugyanis pl. ha „szép” diffúz visszaverődést akarunk elérni, akkor olyan sűrűn érdesnek kell lennie a felszínnek, hogy nagyon sok idő lenne a renderelés. Sőt, ha van is időnk kivárni a kép kiszámítását, biztosak lehetünk benne, hogy igen szemcsés, messze nem homogén felszíneket fogunk kapni. Arra, hogy a *reflection mapping* ilyen alkalmazása esetén pontosan mik a korlátok és lehetőségek, most nem térek ki, hiszen ez a téma önmagában komplexebb, mint az eddig tárgyaltak.

Összefoglalás

A megismert alapvető technikákkal kapcsolatban tehát levonhatjuk azt a következtetést, hogy a tökéletes tükröződésnek kulcs szerepe van a valóságosság elérésében. Nagyon kevés olyan anyag van, amelyre szemmel érzékelhetően csak az alapvető fényforrások hatnak. A *lokális illuminációs algoritmusok* pedig csak az ilyen anyagokat tudják modellezni. Használjuk hát bátran azt a lehetőségünket, hogy tudunk tükröződések megjeleníteni! Nem csak a csillogó autók meg a T2000-esek tükröznek, hanem még az izzadt homlok is! **ca**



A cikk szerzője Vass Gergely (FrontFilm). Elérhető a vass_g@freemail.hu címen.



A két testet nem világítja meg semmilyen fényforrás, csupán a tökéletes tükröződések jutnak a kamerába. Látható, hogy a bal oldali golyó érdes felülete miatt közel diffúz módon veri vissza a fényt. Így gyakorlatilag a valódi fényviszonyoknak megfelelően világítottuk meg a golyót!