VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

REALISTICKÉ ZOBRAZENÍ BUDOVY S PROMĚNNÝM OSVĚTLENÍM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAN NAVRÁTIL
AUTHOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

REALISTICKÉ ZOBRAZENÍ BUDOVY S PROMĚNNÝM OSVĚTLENÍM

REALISTIC RENDERING OF A BUILDING WITH VARYING LIGHTING CONDITIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Jan Navrátil
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Adam Herout, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2008

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na realistické zobrazení budov s proměnným osvětlením. Jsou zde ukázány metody, které správným nastavením vlastností světelných zdrojů umožní vytvořit jedinečný vzhled scény. Především se to týká světla dopadajícího do scény ze slunce a oblohy. Vlastnosti tohoto světla jsou popsány vzhledem k počasí, denní době nebo míře oblačnosti. Cílem je vytvoření takového systému, kde změnou jednoho parametru dojde ke změně světelných podmínek. Tyto změny by měly být zachyceny v krátkém videu.

Klíčová slova

realistické zobrazení, globální osvětlení, světlo, světelné zdroje, denní světlo, sluneční světlo, barevná teplota, světelné podmínky, POV-Ray

Abstract

This paper is focused on realistic rendering of interior environments with varying lighting conditions. It proposes methods of setting properties of light sources to achieve a specific scene appearence. It mainly works with light comming from a sky and sun to the scene and describes this light in relation to weather conditions, time of day and overcast factor. The goal is creating easily configurable system in which a single parameter change leads to significant change of lighting conditions. All these changes should be presented in a short video.

Keywords

realistic rendering, global illumination, light, light sources, daylight, sunlight, color temperature, lighting conditions, POV-Ray

Citace

Jan Navrátil: Realistické zobrazení budovy s proměnným osvětlením, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, rok 2008

Realistické zobrazení budovy s proměnným osvětlením

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Herouta, PhD.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

……
Jan Navrátil
18. května 2008

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své rodině a přátelům za pomoc a trpělivost, se kterou mě doprovázeli při psaní této práce. Dále svému vedoucímu Ing. Adamu Heroutovi, PhD. za odbornou pomoc a cenné rady.

© Jan Navrátil, 2008.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

Obsah....1
1 Úvod....3
2 Metody a prostředky realistického zobrazení....5
2.1 Základy principy....5
2.1.1 Osvětlovací model....5
2.1.2 Zobrazovací metody....6
2.1.3 Radiometrie a fotometrie....8
2.2 Světelné zdroje....9
2.2.1 Bodový zdroj....10
2.2.2 Reflektor....10
2.2.3 Směrový zdroj....12
2.2.4 Plošný zdroj....13
2.3 Barva světla....14
2.3.1 Barevné spektrum....14
2.3.2 Teplota barvy....15
2.3.3 Barevné vyvážení....16
2.4 Ostatní vlastnosti světla....17
2.4.1 Měkkost....18
2.4.2 Intenzita....20
2.4.3 Tlumení....21
2.5 Slunce a denní světlo....21
2.5.1 Barva denního světla....22
2.5.2 Analytický model oblohy....24
3 Modelování světelných podmínek....26
3.1 Modelování denního světla....26
3.1.1 Slunce jako bodový zdroj....27
3.1.2 Okno jako plošný zdroj....28
3.1.3 Kombinace bodového a plošného zdroje....29
3.2 Modelování barvy světelných zdrojů....30
3.2.1 Nepřímé osvětlení....30
3.2.2 Výpočet barvy....31
3.3 Modelování zatažené oblohy....32
4 Osvětlení v nástroji POV-Ray....34

4.1 Popis programu....34
4.1.1 Jazyk pro popis scény (SDL)....35
4.1.2 Světelné zdroje....35
4.2 Nastavení scény....36
4.2.1 Specifika scény....36
4.2.2 Výpočet barev....37
4.2.3 Animace....40
4.3 Výsledky experimentů....40
5 Závěr....42
Literatura....44

1 Úvod

Od dob, kdy jsou počítače schopny zobrazovat grafiku, se člověk snaží využít této schopnosti k vytváření obrazů okolního světa. V průběhu let vědci vyvinuli množství algoritmů, metod a postupů, které pomáhají vyrábět obrazy ve stále lepšící se kvalitě. Nemalou měrou tomu pomáhá i technologický pokrok, který nabízí stále výkonnější systémy, na nichž vědci realizují své nápady, které dříve byly jen pouhou představou.

Jednou z oblastí, kterými se počítačová grafika zabývá, je realistické zobrazování. Tento vědní obor zkoumá metody a principy syntézy snímku, které se jen málo odlišují od skutečných obrazů (např. fotografií). Hlavním měřítkem kvality bývá subjektivní dojem pozorovatele, který porovnává dva snímky a rozhoduje, který z nich je vytvořen pomocí počítače a který je skutečná fotografie. Principy zhotovení obrazu na počítači bývají ve všech případech téměř totožné. Základ tvoří trojrozměrný model zobrazované scény, doplněný o popis geometrických a světelných vlastností objektů ve scéně, především jejich barev a materiálů. Tyto vlastnosti jsou důležité pro správné šíření světla. Jak objekty se světlem reagujou lze popsat pomocí osvětlovacího modelu. Jeho krátký popis nalezneme v kapitole 2.1.1. Druhou důležitou složku tvoří světelné zdroje, ze kterých se šíří do scény světlo. Postup syntézy obrazu vypadá následovně. Počítač vypočítá šíření světla ze světelných zdrojů scénou a výsledek se promítne na obrazovku počítače nebo na jiné výstupní zařízení. Metody, které tyto výpočty realizují, si popíšeme v kapitole 2.1.2.

Takový přístup označme termínem „zevnitř – ven“. Máme definovány vstupy, což je popis geometrie scény a světelných zdrojů, a výstupy, neboli požadovaný vzhled obrazu. Jediným úkolem je implementování algoritmů, které transformujou vstupy na výstupy. Tímto stylem pracuje spousta lidí a vědeckých skupin po celém světě. Dokonce se pořádájí soutěže a porovnávají se výsledky prací jednotlivých týmů. Jde o to, kdo nejlépe implementuje algoritmus, který bude vracet požadované výstupní obrázky v předem definované kvalitě.

V této práci se budeme zabývat přesně opačným postupem. Nazveme ho „z venku – dovnitř“. Předpokládejme, že máme k dispozici nástroje pro výpočet globálního osvětlení. Cílem bude popsat způsob, jakým nastavit vstupy, abychom obdrželi konkrétní výstup. Pořád se pohybujeme na úrovni výpočtu osvětlení, a proto se zaměříme právě na světelné zdroje a jejich vlasnosti, jejichž popis najdeme v kapitole 2.2. Jinak řečeno, pokusíme se popsat způsob nastavení světelných zdrojů, abychom dosáhli požadovaných světelných podmínek ve scéně. Způsob, jakým to budeme provádět, by si měl zachovat důležitou vlastnost. Požadujeme-li jiné světelné podmínky, pak by změna konfigurace světelných zdrojů neměla být příliš složitá. Spíš bychom se měli pohybovat na úrovni pouhého přenastavení řídících parametrů světla. Největší změnu světelných podmínek vyvolá barva

světla. Proto si tato vlastnost zaslouží detailní rozbor. V kapitole 2.3 si barvu světla probereme od základní fyzikální podstaty, až po různé barevné reprezentace s důrazem na subjektivitu lidského vnímání. Další vlastnosti světla, které už nejsou tak významné, si shrneme v kapitole 2.4.

Motivací k této práci je skutečnost, že ne vždy panují při pořizování fotografie ideální světelné podmínky. Důraz se klade především na architekturu (interiér, exteriér), protože zde těch variací osvětlení je skutečně mnoho. Nevystačíme si jen s umělými zdroji, ale uvažujeme také přírodní zdroje světla. Různorodost osvětlení přicházející ze slunce a oblohy je umocněna skutečností, že tyto přírodní zdroje světla mají hlavní podíl na celkovém osvětlení scény. Kapitola 2.5 popisuje různé situace, které mohou nastat, a navrhuje základní metody pro jejich řešení při vytváření realistické grafiky. Navíc se můžeme setkat s různými dalšími činiteli, které mohou ovlivnit světelné podmínky ve výsledném obrazu, např. předměty před okny pokoje, barva slunce, počasí, odrazy světla od okolních budov a předmětů atd. Na tyto záludnosti se dopředu příliš nemyslí. Buď jsou modelovány cíleně, kde jsou přesně odladěny parametry světelného zdroje, a nebo se jejich výskyt vůbec neuvažuje. A právě úvahy v této oblasti jsou předmětem kapitoly 3. Uvedeme si problémy, na které můžeme narazit a nastíníme prvotní myšlenky, které vedou k realistickému modelování světelných podmínek.

Cílem této práce bude prozkoumat a popsat způsob nastavení světelných zdrojů a osvětlení ve scéně, které je charakteristické pro konkretní světelné podmínky. Pokusit se najít souvislosti mezi jednotlivými změnami osvětlení a promítnout tyto změny do výsledné animace, která demonstruje postupnou změnu světelných podmínky. Pro ověření našich poznatků použijeme nástroj POV-Ray. O souvislostech v osvětlení a o způsobu reprezentace jednotlivých podmínek a jejich změn v nástroji POV-Ray se více dozvíme v kapitole 4.

2 Metody a prostředky realistického zobrazení

Velká část realistické počítačové grafiky se zabývá vznikem a šířením světla. Jeho skutečná fyzikální podstata je pro potřeby grafiky příliš složitá, a tak se přichází k jistým zjednodušením. Zkoumá se zejména geometrický charakter světla, který je vhodný pro popis chování v prostoru a interakce s okolím. Hlavně se uvažuje následující zjednodušení: světelný paprsek chápeme jako polopřímku a rychlost světla je nekonečná.

Nicméně se zjistilo, že kvalitní realistický obraz vyžaduje realizovat přirozené chování světla. V 80. letech 20. století byly poprvé představeny metody založené na fyzikální podstatě výpočtu osvětlení. Jedná se o metody založené na sledování paprsku a vyzařovací metody. Nedílnou součástí je také popis interakce světla s ostatními objekty ve scéně, neboť jejich vliv na celkový vzhled je nezanedbatelný. Především skutečnost, že světlo se od okolních objektů odráží, je klíčová při popisu chování a šíření světla ve scéně.

2.1 Základy principy

I ty nejsložitější postupy zachovávají základní principy výroby realistického obrazu. I když se algoritmy stále zdokonalují, jejich základní myšlenka se v nich objevuje stále. Proto by bylo na místě si tyto základní principy představit.

2.1.1 Osvětlovací model

Způsob, jakým objekty ve scéně odrážejí dopadající světlo, popisuje *osvětlovací model*. Odraz často závisí na fyzikální struktuře materiálu. Ta často bývá komplikovaná na popis, a proto se jí některé modely snaží vyhnout a výpočet zjednodušit. Nejčastěji používaným modelem tohoto druhu je *Phongův osvětlovací model* [4].

Tento model rozlišuje tři druhy odrazu od materiálu a jejich součtem vznikne výsledný odraz. Dělíme je na zrcadlový (spekulární), difúzní a ambientní. Nejkvalitnější popis odrazivé vlastnosti materiálu umožňuje *dvousměrná distribuční funkce (BRDF, bidirectional reflectance distribution function)*. Detailní popis najdete například v [5].

- **Difúzní odraz.** Dopadající světlo se na povrchu materiálu odráží všemi směry. Tento odraz je typický pro matné povrchy. Směr odraženého paprsku je náhodný se stejnou pravděpodobností.

- **Zrcadlový odraz.** Tento odraz je typický pro lesklé povrchy. Pro idealně zrcadlový odraz platí, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Většina povrchů ale není dokonalých, proto se uvažuje odraz ve směru malého kuželu kolem ideálního zrcadlového odrazu.

- **Ambientní odraz.** Charakterizuje odraz rozptýleného okolního světla. Toto světlo vzniklo mnohonásobnými odrazy od okolních těles a přichází ze všech směrů.

2.1.2 Zobrazovací metody

Základním cílem fotorealistického zobrazování scén je výpočet *globálního osvětlení.* Globální osvětlení zahrnuje odhad a simulaci chování světla v prostoru, jeho odraz a šíření, a přesné určení intenzity a barvy v libovolném bodě daného modelu.

Předpokladem pro správný výpočet globální osvětlení je úplný popis zobrazované scény. Ten obsahuje především popis geometrie modelu, materiálů objektů a také specifikace světelných zdrojů. Takový popis se pošle na vstup algoritmu, jehož jediným cílem je spočítat interakci světla vycházející ze světelného zdroje s ostatními objekty ve scéně.

Většina existujících algoritmů je založeno na dvou základních technikách, popř. jejich kombinací:

- pixelové vzorkování (point sampling) – raytracing
- konečné prvky (finite elements) – radiosita

V prvním případě se obraz zkoumá a počítá pixel po pixelu a v druhém se scéna dělí na elementární části a zkoumají se jejich vzájemné vztahy.

- **Sledování paprsku.** Metoda sledování paprsku (angl. *raytracing*) byla poprvé představena v roce 1980 [3]. Tento základní algoritmus funguje na principu sledování paprsků vyslaných od pozorovatele do scény a počítání vztahu mezi průnikem paprsku z nějakým objektem a světelným zdrojem. Jeho hlavní nevýhodou je, že umí řešit jen základní úlohy globálního osvětlení. Tedy odraz a lom světla a výpočet přímého osvětlení. Ostatní důležité efekty jako nepřímé osvětlení, depth-of-field, rozmazání pohybem (angl. *motion blur*) nelze touto metodou spočítat. Nicméně metoda sledovaní paprsku je základní metodou, od které se odvýjí další mnohem pokročilejší metody.

- **Monte Carlo sledování paprsků.** Abychom byli schopni počítat složitější efekty zmíněné v předchozím odstavci, rozšíříme metodu sledování paprsku o metodu Monte Carlo. V tomto

případě jsou paprsky distribuovány stochasticky za účelem podchycení všech možných cest světelných paprsků. Metody Monte Carlo sledování papsků mohou simulovat všechny druhy světelného šíření. Májí však jednu nevýhodu, kterou je velký rozptyl. Ten se projevuje ve výsledných obrázcích jako šum a obraz se tak stává méně kvalitním.

K odstranění tohoto šumu je potřeba velké množství paprsků, což se samozřejmě projeví na výpočetním čase. Snížení šumu také dosáhneme tím, že paprsky budou distribuovány více opatrněji. Např. metoda dvousměrného Monte Carlo sledování paprsků (angl. *bidirectional Monte Carlo ray tracing*), které funguje na principu vrhání paprsků současně ze zdroje světla a od pozorovatele.

Všechny metody založené na sledování paprsků jsou ze skupiny technik, které zkoumají obraz pixel po pixelu. Geometrie modelu se v tomto případě chová jako „černá skříňka“. Paprsky jsou vrženy do scény a jediné, co se očekává, je hodnota osvětlení a především barvy daného pixelu. Na jednu stranu to má výhodu při výpočtu složitých scén. Na druhou stranu tyto metody nejsou schopny podchytit vzájemné vztahy mezi objekty ve scéně.

- **Radiozita.** Rozdílný přístup než metody sledování paprsku mají metody, které využívají techniku výpočtu *radiozity*. Základem těchto metod je výpočet rovnovážného stavu výměny světla mezi ploškami ve scéně. Scéna se rozdělí na elementární plošky (angl. *finite elements*), u kterých se předpokládá, že se samy mohou stát sekundárními zdroji světla. Poté se výpočtem zjišťuje vztah jednotlivých plošek a jakým způsobem ovlivňují šíření světelných paprsků. Distribuce světelných paprsků se počítá soustavou lineárních rovnic, které se získají z parametrů popisujících vzájemné vztahy mezi jednotlivými ploškami, tzv. *konfiguračními faktory.*

  Algoritmy využívající radiozitu jsou pohledově nezávislé na rozdíl od sledování paprsku. Efektivita této metody se projevuje především u jednoduchých modelů s difúzními materiály. Velká časová náročnost je způsobena především výpočtem hodnot osvětlení a konfiguračních faktorů pro každou plošku ve scéně. V průběhu let bylo vyvinuto spoustu vylepšení a optimalizaci těchto algoritmů. Např. snížení přesnosti výpočtu mezi vzdálenými ploškami, nebo ploškami, které mají zanedbatelný vliv na celkový výsledek.

  Radiozita dále počítá osvětlení v konečné mřížce elementárních ploch. Pokud je mřižka nevhodně zvolena, výsledek výpočtu také může být nepřesný. V důsledku toho má algoritmus problémy s ostrými přechody ve scéně. Např. ostré stíny má radiozita tendenci rozmazávat. Existují jisté postupy, které umí tento problém ošetřit. Jedním z ních je počítat radiozitu dvěma průchody. V prvním by se spočítaly hrany stínu a podle ních by se vytvořila mřížka, ve které by se v druhém průchodu spočítalo osvětlení. Tento postup ale řeší jen část

problému a často vede k modelům z mnoha ploškami a ty pak bývají velmi náročné na výpočet. Obecně lze říct, že radiozita není vhodná pro složité scény, ale konečný vzhled zobrazované scény již je dostatečně realistický.

Často se setkáváme s tím, že pro dosažení co nejlepších výsledků se použijí obě metody radiozity a sledování paprsku společně. Radiozita pro výpočet nepřímého osvětlení a difuzních odrazů a sledování paprsků pro zvýraznění detailů a výpočet odlesků a stínů.

- **Fotonové mapy.** Princip mapování fotonů (angl. *photon mapping*) je poněkud odlišný, než u předchozích metod. Hlavní rozdíl spočívá v odlišné reprezentaci osvětlovací informace. Namísto toho, abychom shromažďovali přírustky světla přímo v modelu, uložíme je do separátní struktury, *fotonové mapy* (angl. *photon map*) [1]. Fotonové mapa je vytvářena fotony vyzařovaných ze světelného zdroje a vrhaných do scény. Ve struktuře je uložena informace kde a kolik fotonů ve scéně dopadlo.

  Oddělení informace o dopadajícím světle od modelu je důležitým krokem při výpočtu globálního osvětlení. Za prvé se zjednoduší reprezentace scény a za druhé, fotonová mapa lze s výhodou použít i u složitých scén. Kombinací fotonové mapy s metodou Monte Carlo sledovaní paprsku dostaneme velmi efektivní zobrazovací metodu, která umí vytvářet velmi realistické obrazy. V současné době je možné tyto metody považovat za nejkvalitnější.

2.1.3 Radiometrie a fotometrie

Při studuji jednotlivých zobrazovacích metod nebo principů šíření světla a vzniku realistických obrazů narazíme na pojmy, které do počítačové grafiky přišly z fyziky. Zkoumáme-li fyzikální vlastnosti světla a principy založené na fyzikálních zákonech, nevyhneme se veličinám, které fyzikální zákonitosti popisují. Především veličiny z oblasti popisu chování světla. Ty nejzákladnější a nejčastěji používané si ve zkratce vysvětlíme.

Radiometrie je část optiky, která se zabývá měřením elekgromagnetického záření, včetně světla. *Fotometrie* je vědní disciplína, která měří pouze viditelné světlo v jednotkách závislých na citlivosti vnímání lidského oka. Radiometrické a fotometrické veličiny jsou vzájemně propojeny a téměř vždy jde jedna vyjádřit ze druhé. V následujícím textu si některé základní veličiny důležité pro popis světla popíšeme.

Jména veličin jsou uváděny jak v českém tak anglickém jazyce. Většinou existuje český ekvivalent nicméně většina odborné, především cizojazyčné literatury, užívá anglických termínů. Značení jednotlivých veličin a jednotlivé formule jsou totožné. Většinou se liší pouze indexací. Uvádět budeme pouze jeden tvar.

- **Zářivý a světelný tok.** *Zářivý tok* (angl. *radiant flux* nebo *radiant power*) je míra energie (Q, jednotka *Joule*) přenesená elektromagnetickým zářením za jednotku času. Jednotka je *watt* $[W = J \cdot s^{-1}]$. *Světelný tok* (angl. *luminous flux*) značí výkon viditelného světla. Jednotka je *lumen* $[lm]$. Tato veličina je z hlediska vnímání světla velmi důležitá, protože právě světelný tok udává skutečné množství viditelného světla, které jsme schopni vnímat.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1}$$

- **Intenzita ozáření a osvětlení.** *Intezita ozáření* (angl. *irradiance*), též hustota světelného výkonu na ploše, udává množství zářivého toku na jednotkovou plochu. Značíme E, má jednotku $[W \cdot m^{-2}]$ Plošnou hustotu světelného toku popisuje *osvětlení* (angl. *illuminance*). Jednotka *lux* $[lm \cdot m^{-2}]$.

$$E = \frac{d\,\phi}{dA} \tag{2}$$

- **Měrná zářivost (zář) a měrná svítivost.** *Měrná zářivost* (angl. *radiance*) udává přijatý či vyzářený výkon na jednotkovém prostorovém úhlu na jednotku kolmo promítnuté plochy. Jednotka $[W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}]$. Měrné zářivosti odpovídá ve fotometrii *měrná svítivost* (angl. *luminance*). Jednotka *kandela* na metr čtvereční $[cd \cdot m^{-2}]$.

$$L = \frac{d^2\phi}{\cos(\Theta)\,dA\,dw} \tag{3}$$

2.2 Světelné zdroje

Přítomnost světla a světelných zdrojů je jednou z důležitých částí, které popisují scénu kromě její geometrie. Světlo nám dává základní předpoklad, abychom ve scéně mohli něco pozorovat. Světlo samo o sobě nevzniká samovolně, a proto je nutné se zamyslet, z jakého zdroje pochází a jakým způsobem se šíří. Představíme si jednotlivé druhy světelných zdrojů a jejich parametry a ukážeme si, jaký mají vliv na celkový vzhled zobrazované scény a hlavně na vyjádření světelných podmínek.

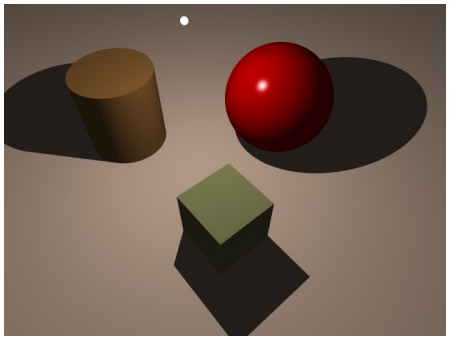
Podíváme-li se kolem sebe, tak uvidíme spoustu druhů světelných zdrojů [12]. Každý z nich dává scéně jiný charakter. V této kapitole se dozvíme, jaký druh světelného zdroje zvolit, abychom dosáhli požadovaného světelného efektu. Výběr typu světelného zdroje je velmi důležitý krok a měl by vést k co nejkvalitnějšímu obrazovému vjemu, který realisticky reprezentuje zobrazovanou scénu.

2.2.1 Bodový zdroj

Již podle názvu lze usoudit, jaké vlastnosti takový druh světla bude mít. Bodový (všesměrový) zdroj světla bývá reprezentován nekonečně malým bodem v prostoru, ze kterého zaří světelné paprsky rovnoměrně do všech směrů.

V reálném světě se s takovým zdrojem světla jen težko setkáme. Většina jich totiž vyzařuje více světla v jednom směru, než v jiném. Např. pokud bychom chtěli reprezentovat žárovku jako bodový zdroj světla ve scéně, pak pamatujme, že i žárovka je tvořena kovovou objímkou a bývá upevněna v nějakém držadle, což brání v šíření světla těmito směry.

Často se stává, že směr bodového zdroje světla bývá omezen nějakým vzorem nebo texturou, která omezí vyzařování světla v daném směru. Druhou častou situací je spojení bodového zdroje světla s nějakým objektem, který také usměrní směr světla (např. kryt lampičky).

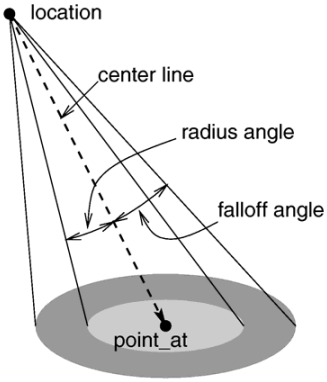


Obrázek 2.1: Ukázka bodového zdroje světla

2.2.2 Reflektor

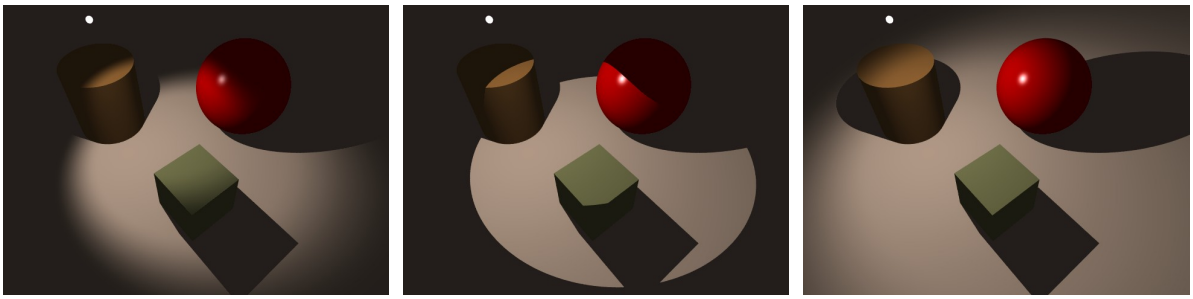
Reflektor (angl. *spotlight)* tvoří základní stavební kámen počítačové grafiky při vytváření osvětlení scén. Vychází z bodového zdroje světla, ale na rozdíl od něj je směr jeho záření omezen do kuželového tvaru (obr. 2.2). Natočením reflektoru do různých směrů určujeme, kam má svazek světla mířit.

I když vychází z jednoduchého modelu, má oproti ostatním druhům světelných zdrojů své specifické vlastnosti a nastavení, které se u jiných zdrojů nevyskytují. Např. lze zviditelnit kuželový svazek při prosvícení skrz mlhu, což se může hodit pro spoustu vizualních efektů, nebo jen pro kontrolu nastavení parametrů zdroje.



Obrázek 2.2: Schéma reflektoru

Dalším důležitým parametrem reflektoru je šířka kužele světla (angl. *radius angle*). Šířka se udává ve stupních a určuje, jestli kužel bude vrhat úzký svazek světla nebo naopak široký. S tím je spojeno chování na okrajích kužel. Neboli jak měkký bude přechod mezi intenzivním světlem uvnitř kuželu a zcela neosvětlenou částí (obr. 2.3a.). Tuto vlasnost popisuje hodnota *falloff angle*. Čím větší tato hodnota bude, tím delší bude přechod ze světla do stínu a tím pádem bude méně zřejmé, která plocha je reflektorem osvětlována. Na druhou stranu, pokud se hodnota falloff bude malá, rozdíl mezi světlem a stínem bude krátký a vytvoří se tak světlý kruh (obr 2.3b.). Takový efekt můžeme pozorovat třeba v divadle nebo na koncertě, kdy v temném sále osvětlovač osvítí herce nebo zpěváka. Při zobrazování interiérových scén můžeme z výhodou použít reflektoru s měkkými hranami (obr 2.3c.), který namíříme proti oknu a osvětlíme tak plochu kolem něj, což by se v realných podmínkách stalo.



a) b) c)

Obrázek 2.3: Zobrázení parametrů reflektoru

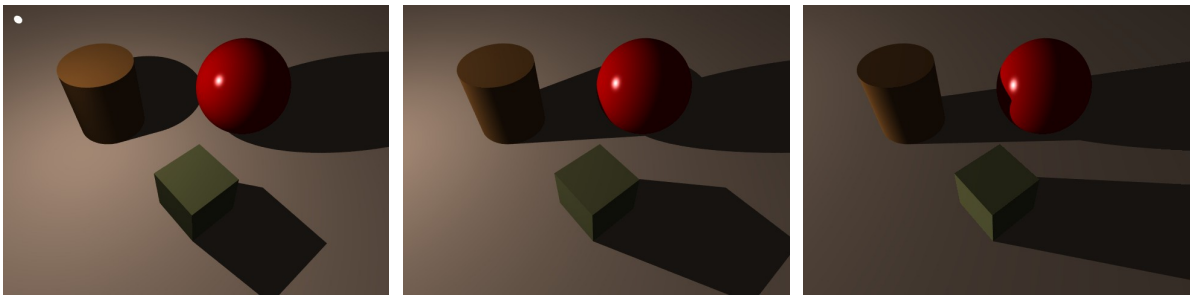
Jelikož je ovládání a nastavování reflektorů velmi jednoduchou záležitostí, běžně se jich využívá k osvětlování scén. Někteří designéři dokonce používají ve svých scénách jen a pouze reflektory a dokáží díky nim nasimulovat jakýkoliv druh osvětlení. Vůči skutečnému světu, kde jsme

z velké části omezeni velikostí reflektorů, máme v počítačové grafice velkou výhodu v tom, že naše reflektory mohou být nekonečné malé. Můžeme si tedy dovolit použít je i v místech, kde by to normálně nebylo možné, např. světlo od stolní lampy aj.

2.2.3 Směrový zdroj

U tohoto druhu světelného zdroje nepůjde ani tak o to, jaký má tvar nebo velikost nebo o jeho specifické vlastnosti. Nyní budeme zkoumat jev, který nastane za určité situace a který může při osvětlování scény hrát důežitou úlohu.

Uvažujme následující základní poznatek. Čím dále je světelný zdroj od osvětlovaných objektů tím více se jejich stíny stávají rovnoběžnějšími (obr. 2.4a-c). V ideálním případě bychom mohli posunout zdroj světla do nekonečné vzdálenosti a stíny by byly zcela rovnoběžné. Snad nejznámějším příkladem z realného světla je slunce a sluneční světlo. Podle naší domněnky bychom slunce simulovali jako bodový zdroj světla umístěný nekonečně daleko od objektu. Jelikož se ale pohybujeme v oblasti počítačové grafiky, kde zkrátka musíme počítat s tím, že neexistuje nic, co je nekonečně velké, nahradíme nekonečně vzdálený bodový světelný zdroj světlem směrovým.



a) b) c)

Obrázek 2.4: Ukázka vlivu vzdálenosti světelného zdroje na polohu stínů

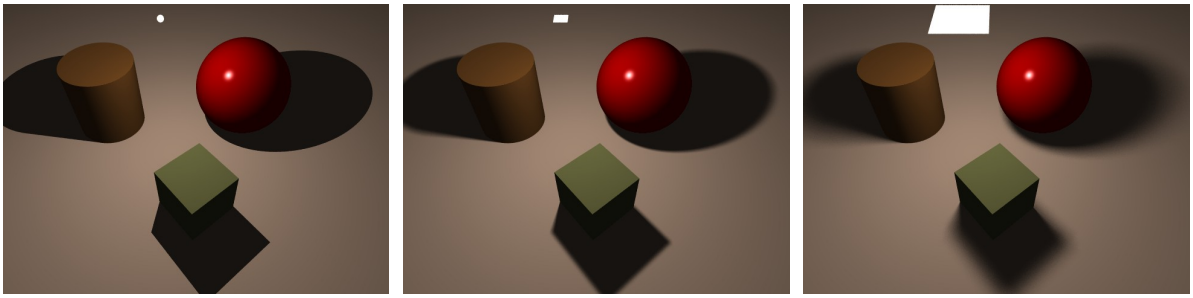
Z předchozích úvah vyplývá hlavní výhoda směrových světelných zdrojů. Existuje pro něj pouze jediný směr záření světla a světelný paprsek dopadá na každý objekt pod stejným úhlem bez ohledu na to, jaká je momentální poloha objektu. Pro stíny pak platí, že jsou vrženy všechny stejným směrem.

U směrové zdroje světla není důležitá jeho poloha vůči osvětlovaným objektům, ale směr, kterým vysílá své paprsky. Směrové světla slouží ve většině případů jako sekundární zdroj osvětlení, protože vzhledem ke svým vlastnostem pokrývají velkou plochu a je velmi težké jimi osvítit jen část scény. Na druhou stranu se velmi často používají k simulaci ambientního osvětlení např. světlo z oblohy apod.

2.2.4 Plošný zdroj

Až do této chvíle jsme se setkávali s tím, že objekt osvícený buď bodovým zdrojem světla nebo reflektorem vrhal stín s ostrými hranami. Je to dáno tím, že oba tyto světelené zdroje vyzařují světlo z nekonečně malého bodu v prostoru, který nemá žadnou velikost. V reálném prostředí se jen zřídka setkáme s ostrými stíny. Objekty kolem nás vrhají měkké stíny. Abychom mohli takový jev simulovat, přizpůsobíme si světelný zdroj tak, aby více odpovídal reálným podmínkám. Ať už vezmeme v úvahu jakýkoliv světelný zdroj, vždy u něj pozorujem určitý rozměr. Tedy paprsky nevycházejí vždy jen z jednoho bodu, ale z určité plochy. Tyto zdroje nazýváme plošné.

Pokud plocha vyzařující světelné paprsky bude velmi malá, pak s jistou mírou abstrakce můžeme takový plošný zdroj připodobnit k bodu, a proto světelné podmínky i vržené stíny budou stále ostré (obr 2.5a), což charakterizuje bodové zdroje. S roustoucí velikostí plošného zdroje stoupá i rozsah osvícení daného bodu a stínové přechody se stávají více plynulejší (obr. 2.5b-c). Jinak řečeno, vytváří se měkké stíny.



a) b) c)

Obrázek 2.5: Vliv velikosti plošného zdroje

Samozřejmě kvalita výsledného obrazu se podepíše i pod rychlostí výpočtu zobrazení obrazu, který v případě plošných zdrojů je delší, než u předchozích druhů. Porovnáme-li obraz s bodovým zdrojem světla (obr. 2.5a) a obrázek obsahující plošný zdroj světla (obr. 2.5c), pak doba potřebná k jejich zobrazení je pochopitelně odlišná:

- Bodový zdroj: 1,45 s
- Plošný zdroj: 8,82 s

Důležitou roli v konečném vlivu plošného zdroje hraje kromě jeho velikosti také tvar. Zdroje kolem nás jsou vesměs plošné a jejich tvary jsou různorodé. Z této skupiny vybereme dva základní druhy, které se odlišují v několika důležitých rysech

- **Kulové plochy.** Jedná se o trojrozměrné plošné zdroje světla. Jak již název napovídá, tvar tvoří kulová plocha. Výhoda u toho druhu plošného zdroje je ta, že velikost osvětlovací plochy se nemění při jeho rotaci nebo při změně polohy osvětlovaného předmětu.

  S úspěchem se kulového plošného zdroje používá v případech, kdy potřebujeme simulovat bodový zdroj světla či vytvoření více difuzního vzhledu scény s měkkými stíny

- **Rovinné plochy.** Ve většině případů reprezentují plošné zdroje obdelníky nebo plochy ve tvaru kruhu. Světlo je vyzařováno jen ze dvourozměrného světelného plošného zdroje, což může snížit výpočetní čas.

  Rovinné plošné zdroje uvidíme v situacích, kdy potřebujeme simulovat zaření jisté větší plochy ve scéně. Typickým příkladem je odraz světla od stěn v místnosti. Nejedná se o hlavní světelný zdroj, nicméně má značný vliv pro vytvaření realistického obrazu, měkkých stínů, ambientního osvětlení apod.

  Na rozdíl od kulových ploch je rozdíl v tom, jakým způsobem je rovinný zdroj světla natočen k objektu, který osvětluje. Pokud je k němu natočen celou plochou, objekt vrhá měkké stíny. Na druhou stranu, pokud k objektu natočí hranu plošného zdroje, pak stíny budou více ostré.

2.3 Barva světla

V běžném slova smyslu chápeme barvu jako vlastnost nějakého objektu. Toto tvrzení není zcela přesné, protože barvu jako takovou vnímáme až v našem mozku. Správným pochopením fyzikální podstaty vzniku barvy můžeme lépe pracovat s jejími hodnotami při nastavováná parametrů světla.

V následujících kapitolách si vysvětlíme vznik barvy z viditelné části světla. Ukážeme si způsob barevné reprezentace, který je trochu odlišný od zažitých principů. Naznačíme způsob uplatnění těchto poznatků při vytváření osvětlení ve scéně.

2.3.1 Barevné spektrum

Barva vzniká jako vjem na lidské sítnice, který vyvolá viditelné spektrum světla o vlnových délkách přibližně od 400nm do 700nm [13]. Energie světelného spektra je vyjádřena ve *spektrálním rozložení energie* (angl. s*pectral power distribution, SPD*) pro jednotlivé vlnové délky (monochromatické zdroje světla). To nám říká, do jaké míry ovlivňuje daná vlnová délka receptory v oční sítnici. Lidská sítnice obsahuje tři typy barevných receptorů, tzv. č*ípky*, které reagují na dopadající světlo. Podle odezvy z čípků se nám v mozku vytváří barva. Protože počet těchto receptorů v oku je přesně tři, pak potřebujeme také tři složky k popisu barvy. V roce 1931 schválila komise CIE (Commission

Internationale de L'Éclairage) barevné srovnávací funkce, které vyjadřují transformaci barvy s daným spektrálním rozložením na tři složky definující barvu. Z těchto složek potom určíme subjektivně vnímatelné barvy v některém z barevných prostorů (CIE 1931 XYZ, CIE 1931 xyY atd.) [5]. Tyto barevné prostory mohou být po úpravách převedeny na RGB, CMYK, HSB, CIE L*u*v* apod. [14] a získáme tak vyjádření barvy, které odpovídá našim potřebám.

Protože v této práci pracujeme především se světlem, pak právě způsob popisu barvy světla je pro nás velmi důležitý. Standardy CIE popisují vztahy mezi barvami, které vychází z fyzikálního popisu světelných vlastností. Člověk vnímá světlo dohromady ze všech světelných zdrojů, které se ve scéně vyskytují, a umí si vyhodnotit jejich jednotlivé příspěvky a tím chápe barvy ve scéně velmi přirozeně. Totéž požadujeme i při vytváření realistického obrazu. Na scénu působí různé světelné zdroje, které mají barvy definované spektrálním rozložením energie. Standardy CIE do velké míry pomáhají tento problém vyřešit. Pro konkrétní typy světelných zdrojů existují hodnoty jejich spektrálních rozložení a ty pak použijeme pro definování barvy světelného zdroje v naší scéně .

2.3.2 Teplota barvy

Barvu v aplikacích počítačové grafiky udáváme nejčastěji pomocí barevných složek RGB. Popis barvy světelných zdrojů se někdy také charakterizuje pomocí teploty barvy udávané v Kelvinech. Týká se to především těch objektů ve scéně, které mají schopnost emitovat do okolí světlo.

Tento termín je odvozen od toho, že při postupném zahřívání černého tělesa na určitou teplotu vyzařuje toto těleso stejné barevné spektrum, které odpovídá barvě daného světelného zdroje. Například některé žárovky mají teplotu světla 2800K. Se stoupající teplotou přechází barva od červené při nižších teplotách až po modrou při vysokých teplotách [12][16]. Samotná teplota nemá nic společného se skutečnou teplotou světelného zdroje, ale pouze z barvou emitovaného světla.

Termín barevná teplota se běžně chápe nesprávně. Teplé barvy jako červená vznikají pří nízkých teplotách kolem 2500K, naopak studené barvy jako modrá a šedá můžeme pozorovat pří vyšších teplotách kolem 10000K. Tedy obraz, o kterém tvrdíme, že je v teplých barvách, se ve skutečnosti skládá z barev s nízkou teplotou a naopak.

V našem případě můžeme za černé těleso pouvažovat slunce a stejně tak třeba svíčku nebo zářivku. Na obrázku 2.6 jsou uvedeny teploty barev některých zdrojů světla i s jejich barvami. Existuje jednoduchý důvod, proč používat právě teplotu barvy místo RGB pro definování barvy světelných zdrojů. Pomocí barevné teploty získáme spojité spektrum barev, které odpovídá konkrétním druhům světelných zdrojů. Porovnáme-li teploty barev dvou světelných zdrojů, můžeme jednoduše odhadnout jejich vzájemný vztah a jejich barevný vliv na scénu. Tento jev se nejvíce projeví při barevném vyvažování (více kapitola 2.3.3). Pouhým zvyšováním nebo snižováním teploty změníme barvu světelného zdroje. Tento jednoduchý převod v barevném modelu RGB prakticky

neexistuje a tedy by nebylo jednoduché vytvořit takový vztah mezi barevnými složkami, který by bylo možné jednoduše ovládat a měnit.

Degrees Kelvin	Type of Light Source	Indoor (3200k) Color Balance	Outdoor (5500k) Color Balance
1700-1800K	Match Flame		
1850-1930K	Candle Flame		
2000-3000K	Sun: At Sunrise or Sunset		
2500-2900K	Household Tungsten Bulbs		
3000K	Tungsten lamp 500W-1k		
3200-3500K	Quartz Lights		
3200-7500K	Fluorescent Lights		
3275K	Tungsten Lamp 2k		
3380K	Tungsten Lamp 5k, 10k		
5000-5400K	Sun: Direct at Noon		
5500-6500K	Daylight (Sun + Sky)		
5500-6500K	Sun: through clouds/haze		
6000-7500K	Sky: Overcast		
6500K	RGB Monitor (White Pt.)		
7000-8000K	Outdoor Shade Areas		
8000-10000K	Sky: Partly Cloudy		

Based on information from the book [digital] Lighting & Rendering
Chart and colors (c)2003 Jeremy Birn for www.3dRender.com

Obrázek 2.6: Tabulka barevných teplot pro některé zdroje světla [12]

2.3.3 Barevné vyvážení

Aby bylo možné při vytváření snímků správně zobrazovat barvy světelných zdrojů, musíme brát v úvahu *barevné vyvážení* scény. Například při fotografování se barvy světla přízpůsobí podle nastavení vyvážení filmu.

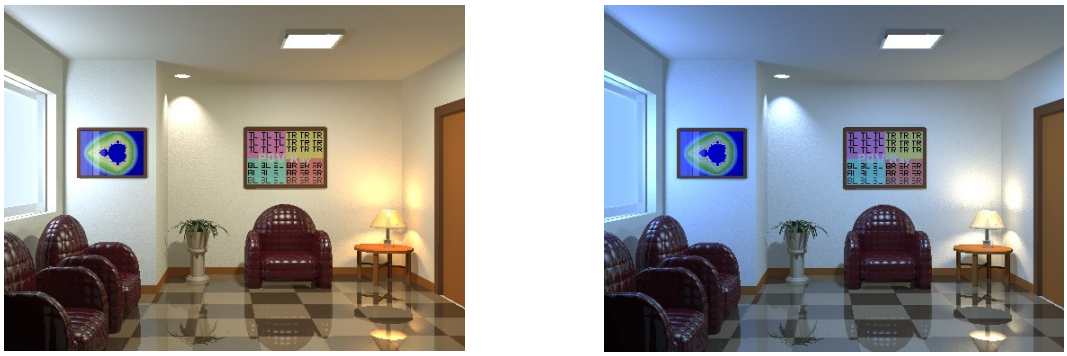
Barevné vyvážení udává, jaká barva světelného zdroje je ve scéně považována za bílou. Vzhledem k této referenční barvě se odvozují barvy ostatních světelných zdrojů. Objekty ve scéně, které jsou takovým „bílým“ světlem osvíceny, vnímá lidský zrak ve skutečných barvách. Pokud jsou objekty osvíceny ještě dalšími světelnými zdroji, pak tyto objekty budou mít navíc ještě nádech barvy světla těchto zdrojů.

Nastavení barevného vyvážení je důležité především při fotografování (zde se používá spíše termín *vyvážení* bílé [15]) a při filmové produkci. U člověka se tento jev projevuje zcela automaticky. V běžném životě se člověk pohybuje v prostředí, kde v různou dobu panují různé světelné podmínky. Jednou je svět kolem nás osvícen vycházejícím slunce, jindy zase světlem zařivek a lamp v kancelářích a obchodních domech. Lidský zrak má schopnost přizpůsobit se dominantní barvě světla ve scéně a tu pokládat za bílou. Díky tomu vnímá objekty kolem sebe přirozeně zabarveny.

Počítačové programy obvykle schopnost barevného vyvážení nemají, a proto musíme při vytváření obrazů brát ohled na nastavování barev světel, abychom docílili realistického vzhledu barev všech objektů ve scéně. Pro účely správného nastavení se barva světla a hodnota barevného vyvážení

udává teplotou barvy (kap. 2.3.2). Obě hodnoty se musí zadat současně, aby to pro výsledný obraz dávalo smysl. Sice můžeme zadat barvu světla teplotou, která se pak převede na RGB. Bez hodnoty barevného vyvážení mohou být barvy zcela nesprávné a neodpovídající skutečnosti. Proto je nutné pro realistický vzhled barev a celé scény nastavit obě hodnoty.

Například pokud nastavíme barevné vyvážení pro interiéry, objekty osvětlené žárovkou budou mít přirozenou barvu, ale světlo přicházející z venku skrz okno získá modrý nádech (obr. 2.7b). Na druhou stranu pro venkovní scény je barevné vyvážení nastaveno především na přirozené sluneční světlo. Pro snímky místnosti to znamená, že venkovní světlo má bílou barvu, ale umělé zdroje světla, např. lampy, budou zabarveny do oranžova (obr. 2.7a).



a) b)

Obrázek 2.7. Rozdíl v barevném vyvážení snímků

2.4 Ostatní vlastnosti světla

Kromě tvarů a velikostí světelných zdrojů jsou důležitým činitelem ovlivňující celkový vzhled vlastnosti konkrétního světelného zdroje. Nastavení jejich parametrů nebo jen jejich malá změna může vyvolat velkou změnu v osvětlení ve výsledném obraze.

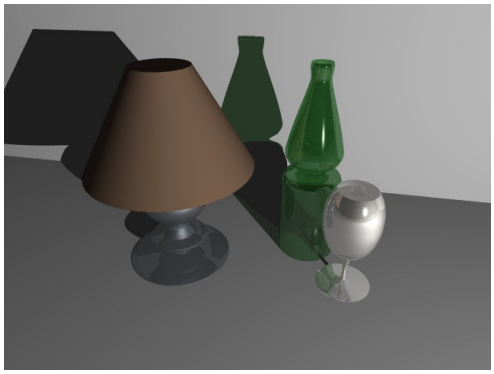
Přírodní světlo v podobě slunce nebo umělé v podobě stolní lampy nebo zářivky jistě nevyzařují stejné světlo. Každé může mít rozdílné vlastnosti, které ho charakterizují, a každé přispívá jiným dílem pro celkový vzhled zobrazované scény. Představme si scénu za poledního slunce nebo při svitu půlnočního měsíce nebo osvětlenou jen ohněm planoucím v krbu. Byť by se jednalo o tutéž scénu, v každém z těchto případů by v konečné podobě vypadala úplně jinak. A to nejenom svým vzhledem, ale i třeba způsobem, jakým na nás působí. Dopředu je možné odhadnout, jak konkrétní světlo ovlivňuje konečný výsledek. Kromě své polohy ve scéně mají světelné zdroje i několik rysů, které můžeme snadno popsat a rozeznat. Tyto rysy budeme souhrnně označovat jako *vlastnosti světla* [12].

2.4.1 Měkkost

První a snad i nejdůležitější vlastností světla je měkkost (angl. *softness*). V počítačové grafice se ovšem na tuto vlastnost zapomíná a kvalita jeji interpretace bývá často nepříliš dobrá. Podle této vlastnosti rozlišujeme tedy světlo na tvrdé a měkké.

Nejběžnější světelné zdroje v počítačové grafice (bodový, reflektor) produkují tvrdé světlo. Vyznačuje se tím, že vrhá velmi ostré stíny, kde pozorujeme zřetelný přechod mezi světlou a tmavou oblastí, a také bývá více zaostřeno na daný objekt, na kterém poté vznikají malé jasné odlesky. Nejčastěji se jedná o velmi malý světelný zdroj, nebo velmi vzdálený světelný zdroj, např. slunce, které za jasného počasí vrhá také ostré stíny (obr. 2.8a). Modelování tvrdého světla nebývá většinou příliš složité.

Naproti tomu podchytit měkké světlo už může být docela problém. Už jenom proto, že jeho výskyt v reálném světě je mnohem častější. Stačí se rozhlédnout kolem sebe. Měkké světlo je takové, které se nějakým způsobem rozptýlí do okolí. Uvažujme světlo žárovky, které proniká skrze kryt stolní lampy, nebo již dříve zmíněné sluneční paprsky, ale tentokrát prostupující zamračenou oblohou (obr. 2.8b). Můžeme tedy předpokládat, že měkké světlo vrhá měkké stíny a osvětlovaný objekt je nasvícen více „zeširoka“.



a)

b)

Obrázek 2.8. Rozdíl mezi tvrdým a měkkým světlem

Ve skutečném světě se setkáme s oběma druhy. Abychom mohli vytvářet realistické obrázky a scény, musíme vědět, které z nich a v jaké míře použít, aby se výsledný produkt co nejvěrněji podobal své reálné předloze. V následujícím seznamu si uvedeme několik případů použití jednoho či druhého druhu světla:

Tvrdé světlo:

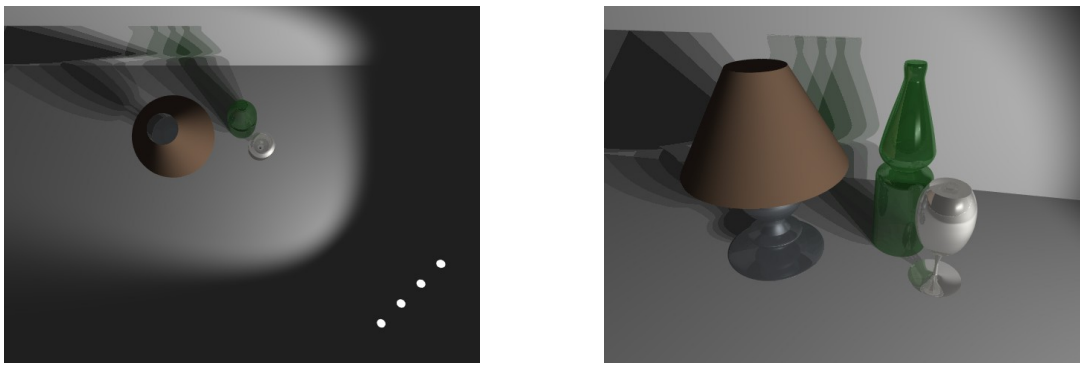
- osvětlení přicházející z malého světelného zdroje s velkou koncentrací, např. samotná žárovka visící u stropu
- přímé sluneční světlo za jasné oblohy
- osvětlení vesmírných scén, protože zde není světlo nijak rozptylováno v žádné atmosféře
- dojem umělého osvětlení, např. reflektor v divadle
- vytváření stínu rozpoznatelných tvarů, např. stínohra
- osvětlení nehostinného prostředí – tvrdé světlo vyvolá u člověku negativní náladu

Měkké světlo:

- přírodní osvětlení při zatažené obloze
- nepřímé osvětlení, např. světlo odražené od stěn
- světlo po průchodu průsvitným materiálem, např. závěsy
- vyvolání příjemné, pohostinné atmosféry – měkké světlo vytváří příjemný dojem ze scény
- zvýšení realističnosti obrazu

Jak již bylo řečeno dříve, tvrdé světlo vytvoří buď bodový zdroj světla, nebo reflektor. V tomto případě již žádné další triky pro úpravu nejsou potřeba. O trochu složitější je situace v případě měkkého světla, kde už máme na výběr z několika možností.

Nejsilnějším nástrojem pro modelování měkkého difuzního světla jsou plošné světelné zdroje. Díky jejich stavbě se lehce vyhneme tomu, aby nám světlo přicházelo pouze z jednoho bodu. Důležitou vlastností je velikost plochy. Čím je plocha světelného zdroje větší, tím měkkčí bude výsledné světlo a stíny. Avšak v počítačové grafice se se skutečným plošným zdrojem nesetkáme. Protože z důvodů ušetření výpočetního času bývá často nahrazen jinými a efektivnějšími modely zdrojů světla. Jednou z několika možných variant je nahrazení plošného zdroje maticí jiných elementárních zdrojů světla, které svou povahou nahrazují funkci plošného zdroje (obr. 2.9a). Dále jsou potřeba další doplňující efekty, které vytvoří požadovanou měkkost ve stínech.



a) b)

Obrázek 2.9. Jedna z možností simulace měkkého světla

2.4.2 Intenzita

Jednou z vlastností, kterou si člověk uvědomí na první pohled je intenzita (nebo také jas). Nutné si uvědomit, že ve chvíli, kdy pozorujeme scénu osvícenou přímým slunečním zářením nebo světlem svíčky, tak se naše oči dokáží přizpůsobit jasu světla přicházejícího z okolního prostředí. To vyplývá z fyzikální podstaty lidského vnímaní, jak bylo popsáno v kap. 2.3, protože svíčka a sluneční světlo mají různé rozložení energie, a proto na ně lidský zrak reaguje odlišně.

Tohle někdy bývá problém u pořizování fotografií nebo vytváření filmu, kdy totiž máme k dispozici jen omezené množství barevných tónů, kterými musíme správně zobrazit obraz jak se sluncem, tak s plamenem svíčky. Jelikož má slunce nesrovnatelně větší intenzitu než jakýkoliv umělý zdroj, tak se barevné tóny v obrazu musí podle toho přízpůsobit. Pokud se na snímku objeví slunce, tak všechny okolní předměty jsou tmavé, protože přístroje nejsou schopny vyrovnat tak vysoký kontrast jako lidské oko.

V počítačových programech často nenajdeme funkci nastavení expozice, jak tomu bývá u kamery nebo fotoaparátů. Díky tomu se přístroje přizpůsobí tmavějším nebo jasnějším scénám. V počítačové grafice, hlavně při vytváření realistických snímků, se hodnota intenzity světla odhaduje podle požadovaného výstupního obrazu. Odhad probíhá většinou náhodným výběrem hodnoty a porovnání výsledku, dokud se nám obraz nebude líbit.

Jelikož se vzhled světla mění s každou zobrazovanou scénou, musíme v každém snímku brát v úvahu nastavení a parametry každého světla. Např. světlo stolní lampy, která svítí v temném pokoji, bude mít jinou intenzitu, než když tutéž lampu, s tou stejnou žárovkou rozvítíme v místnosti, do které svítí přímé sluneční světlo. Jinak řečeno, intenzitu lampy musíme snížit podle charakteru okolní scény. Člověk si tuto úpravu dokáže udělat sám, ale počítači tohle musíme říct.

2.4.3 Tlumení

Dalším důležitým faktorem, který kromě intenzity v různých expozicích, ovlivňuje vzhled, je vzdálenost světelného zdroje od osvětlovaného předmětu. Množství světla dopadající na předmět je v nepřímé uměrnosti se jejich vzdáleností. Jinak řečeno, čím dál je předmět od zdroje světla, tím měně světla na něj dopadne. Tento pokles intenzity nazveme tlumení (angl. *attenuation*).

Rychlost tlumení se řídí pravidlem *převraceného čtverce* (angl. *inverse square law).* Znamená to, že intenzita světla v daném bodě na osvětleném předmětu se rovná intenzitě bodového zdroje světla děleno druhou mocninou jejich vzdáleností.

Z předchozího pravidla vyplývá. že světelný zdroj může ozařovat libovolný objekt ve scéně bez ohledu na to, jak daleko jsou od sebe. Dále je zřejmé, že neexituje hranice, kde bychom řekli, že světlo už nesvítí. Sice se intenzita blíží k nule, nikdy jí však nedosáhne. Nutno ale podotknout, že při určité vzdálenosti přestává mít světlo vliv na celkové osvětlení ve scéně. Pomocí pravidla převráceného čtverce se dá snadněji odhadnout velikost osvětlované plochy. Jasnější světlo pokryje větší část scény, na druhou stranu méně jasné světlo bude osvětlovat oblast jen ve svém nebližším okolí. Nicméně díky rozptýlení světla po scéně a dalším vlivům není pravidlo převráceného čtverce přesne pro vytváření realistických scén. Protože světlo jednak slábne velmi rychle a osvětlení je z toho důvodu více tlumené, než by mělo být. Na druhou stranu se na objekt dostane odrazem od okolí další světlo a objekt vypadá jasnější.

Abychom se vyhnuli nepřesnosntem v měření, můžeme pravidlo převráceného čtverce upravit s použitím lineárního tlumení (angl. *linear attenuation*). Lineární tlumení vytváří více realističtější přechod mezi světlem a tmou. Pomocí něho lze nastavit přesnou vzdálenost, do které si přejeme, aby světlo mělo vliv na celkové osvětlení a do této vzdálenosti bude intenzita světla lineárně klesat až k nule. Chování světla je v tomto případě snadno předvídatelné a dá se s ním lépe manipulovat. Např. víme, že v polovině zdálenosti mezi zdrojem světla a jeho utlumením bude mít intenzita světla poloviční velikost.

2.5 Slunce a denní světlo

Pokud chceme vytvářet přesné realistické obrazy architektury, nevystačime si jenom s umělými zdroji světla. Ve většině případů je hlavním zdrojem světelného záření slunce a obloha. Pokud se jedná o modelování venkovních scén, tak zde to je jediný zdroj světla. Nicméně i v případě modelování interéru tvoří sluneční záře přicházející okny nezanedbatelnou část osvětlení.

Pro zjednodušení se používají různé alternativy a kompromisy, např. slunce reprezentuje plošný zdroj umístěný v dostatečně velké vzdálenosti. Taková řešení většinou stačí, ale pokud nás zajímá skutečně realistický výsledek, musíme zapřemýšlet nad jinými a kvalitnějšími způsoby. Navíc

při změně geometrie scény se musí změnit i nastavení „alternativního“ slunce, což vede k dalšímu zdržení a ne vždy jsou jednoduchá řešení vhodná.

2.5.1 Barva denního světla

Denní světlo je hlavní zdrojem světla, a proto jeho barva má nemalý vliv na vzhled scény. V této kapitole si popíšeme některé situace, které na denní obloze mohou nastat, a doplníme je především o popis barev, které jim odpovídají [15]. Tyto úvahy se následně pokusíme experimentálně ověřit.

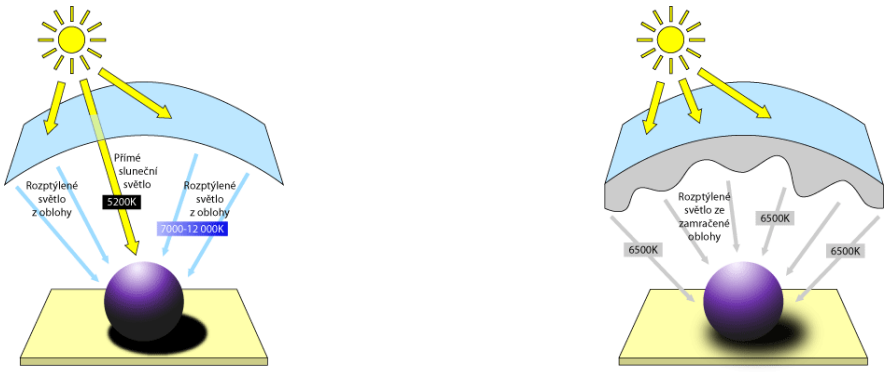
- **Přímé slunce.** Tato situace nastává, když scénu osvětluje slunce za jasné oblohy. Slunce se pak stává hlavním zdrojem světelného záření a jeho barva má pak největší vliv na barevný vzhled scény. Vlivem rozptýlení světla v atmosféře bychom mohli uvažovat také lehce difúzní světlo přicházející z modré oblohy. To však na celkovou barvu nemá takový vliv v porovnání s velkou intenzitou slunečního záření.

  Barevná teplota světla ze slunce udávaná v Kelvinech je 5200K. Modrá obloha potom v závislosti na konkrétních podmínkách může dosahovat barevného rozsahu od 7000K do 12000K (obr. 2.10a). Pokud tyto hodnoty porovnáme se standardem pro bílou barvu, který je 6500K, pak barva slunečního světla má lehce nažloutlou barvu a proto se slunce kreslí obvykle žlutou barvou.

  V dalším textu budeme tento druh světla označovat za *přímé osvětlení.*

- **Zatažená obloha.** V případě zatažené oblohy je světlo ze slunce rozptýleno kromě atmosféry také skrze mraky. Tím světlo získává ještě více difúzní charakter. Difúzní v tomto případě znamená, že z každého bodu se světlo šíří rovnoměrně všemi směry a se stejnou intenzitou. Ve scéně se ztrácejí stíny, světlo má měkký charakter a obraz celkově je poněkud mdlý. Oblaka díky svým rozmanitým tvarům mají velký vliv na celkový světelný dojem. Snad žádný jiný úkaz na nebi nehraje tolika barvami jako obloha pokrytá mraky. Určení konkrétní barevné hodnoty je proto velmi složité. Nicméně barva rovnoměrně zatažené oblohy se pohybuje od 6000K do 7000K (obr. 2.10b). Tyto údaje odpovídají 100% oblačnosti.

  Pokud se míra oblačnosti změní, barevný odstín se podle toho přesune k vyšším teplotám tedy k modrému odstínu.



a) b)

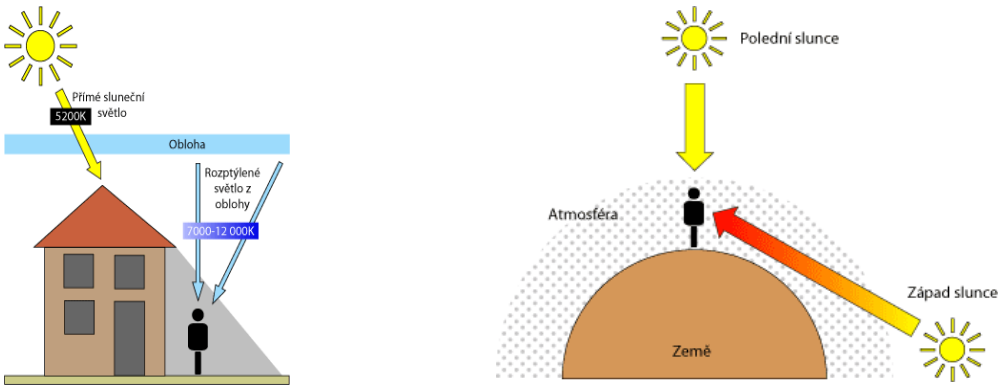
Obrázek 2.10: Barva světla přicházející z oblohy

- **Slunce ve stínu.** Může nastat také situace, kdy je slunce za jasné oblohy zakryto nějakým objektem (mrakem, domem atd.). V tomto případě nebude mít přímé sluneční světlo žádný vliv na vzhled scény, ale barevný charakter scény bude určovat je modrá barva přicházející z oblohy.

  Samozřejmě i v tomto případě závisí výsledek na konkrétní situaci na obloze, tj. počet a rozmístění mraků, čas, roční období apod.. Tedy barva světla z oblohy (angl. s*kylight*) má modrý odstín a její barevná teplota se pohybuje od 7000K do 12000K (obr. 2.11a).

  Jelikož světlo dopadá ze všech stran a obloha se místo slunce stává hlavním zdrojem světla ve scéně, tak toto světlo budeme označovat jako *nepřímé osvětlení.*

- **Východ a západ slunce.** Poslední situací je východ a západ slunce. Na rozdíl od přímého slunečního záření během dne musí světlo procházet silnější vrstvou atmosféry a barva světla se zabarvuje více do červena. Barevná teplota při východu a západu slunce je mezi 2500K-5000K (obr. 2.11b).



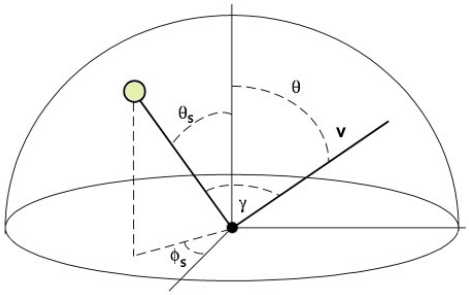
a) b)

Obrázek 2.11: Různé světelné podmínky na obloze

2.5.2 Analytický model oblohy

Oblohu můžeme modelovat s využitím znalostí o světelných zdrojích (viz kapitola 2.2). Tento postup by byl zřejmě náročný kvůli velkému počtu světelných jevů, jak jsme si popsali v předchozí kapitole. Nicméně kromě světelných zdrojů můžeme použít také analytický popis oblohy. Tento popis definuje pro každý bod oblohy jeho vzhled a celkové rozložení osvětlení.

Jelikož oblohu chápeme jako polokouli, pak je na místě používat pro popis souřadnic úhly. Vzhled oblohy se odvíjí od polohy slunce. Proto tato poloha musí být známá před zahájením výpočtu. Na obr. 2.12 je poloha slunce udávána souřadnicemi θ_s, ϕ_s a zkoumaný bod je zadán úhly θ, γ .



Obrázek 2.12. Schématické znázornění modelu oblohy

Vědci definovali parametrický model rozložení osvětlení na obloze, který vychází z měření a není závislý na vlnové délce. Tento model byl nakonec přijat standardizační komisií CIE:

$$L(\theta,\gamma)=L_z\frac{(0.91+10e^{-3\gamma}+0.45\cos^2\gamma)(1-e^{-0.32/\cos\theta})}{0.274(0.91+10e^{-3\gamma}+0.45\cos^2\theta_s)} \tag{4}$$

kde L_z je osvětlení zenitu a ostatní úhly a proměnné odpovídají úhlům na obrázku 2.12. Hodnoty úrovně osvětlení byly doplněny o barevné spektrum odpovídající barevným složkám oblohy v konkrétních bodech [8]. Výsledkem je úplný popis světelných a barevných vlastnostní denního světla přicházející z oblohy.

Tento model dobře fungoval po dlouhou dobu a tvořil základ k dalšímu výzkumu světelných vlastností oblohy. Jeden z velmi úspěšných následovníků je parametrický model rozložení osvětlení oblohy, který nalezneme v [9]. Pro popis se zde využívá pět parametrů, jejichž nastavením docíleme požadovaného fyzikálního efektu na obloze. Tento model má podobu:

$$F(\theta,\gamma)=(1+Ae^{B/\cos\theta})(1+De^{D\gamma}+E\cos^2\gamma) \quad , \tag{5}$$

kde *A, B, C, D* a *E* jsou distribuční koeficienty a θ a γ jsou úhly z obrázku 2.12. Celkové osvětlení oblohy na dané pozici závisí jen na hodnotě osvětlení zenitu a má tvar:

$$L(\theta,\gamma)=L_z\frac{F(\theta,\gamma)}{F(0,\theta_S)} \tag{6}$$

Tento model se velmi podobá modelu CIE, ale zde bylo zjištěno, že vrací přesnější výsledky, pokud se vhodně nastaví parametry *A* až *E*. V literatuře [9] se uvádí postup výpočtu barvy v modelu CIE xyY. Tato barva pro nás bude velmi důležitá při budoucích experimentech a rovnice (5) je stěžejní rovnicí, kterou budeme při výpočtech používat.

Můžeme se setkat ještě s dalšími analytickými modely [19], všechny z nich fungují na stejném principy a většinou vycházejí z modelu popsaném rovnicí (4). Zaměřují se hlavně na to, aby obloha vypadala k nerozeznání od skutečnosti. V této práci se soustředíme na světlo, které z oblohy přichází, a barva oblohy spočítaná pomocí rovnice (6) bude užitečná k nastavení parametrů tohoto zdroje.

Navíc tento model uvažuje ve svých výpočtech polohu slunce, což taky uvítáme, protože se změnou polohy slunce se změníme vzhled oblohy a dojde ke změně osvětlení. A právě na tuhle změnu se pokusíme v našich experimentech zaměřit.

3 Modelování světelných podmínek

V předchozích kapitolách jsme si popsali nástroje a prostředky, které nám budou sloužit jako základní stavební kameny pro modelování a simulaci světelných podmínek. Nyní přistoupíme již ke konkrétním příkladům osvětlení a popíšeme si způsoby a metody pro jejich modelování.

V prostředí různých budov, domů a kanceláří se pohybujeme téměř denně, a tak nám ani nepřijde zvláštní, že pokaždé daná místnost vypadá trochu jinak. Z velké části je to ovlivněno tím, jaké je venku počasí, kolik je hodin či jestli nesvítí někde nějaká lampa nebo zářivka na stropě. Zobrazování architektury a budov je specifické právě tím, že kromě světelných zdrojů uvnitř místnosti tvoří velkou a nezanedbatelnou část světelného záření slunce a obloha. Kdyby veškeré elektrické spotřebiče zůstaly vypnuté, pořád by během dne zbylo v místnosti dostatek světla, které by přicházelo skrze okna. A právě tento zdroj světla je velmi rozmanitý, protože před okny panují různé světelné podmínky, které dávají místnosti různý a často jedinečný vzhled.

Kvalita osvětlení přicházející okny závisí na několika faktorech. V první řadě je to podoba slunečních paprsků rozptýlených skrz mraky. Tedy pokud je jasná, polojasná nebo zatažená obloha. Dále uvažujme barvu slunce, která se mění nejenom při výše zmíněných povětrnostních podmínkách, ale závisí také na denní době a ročním období. Předpokládejme, že slunce má v době ranní a večerní, tedy při východu a západu, barvu více oranžovou. Naproti tomu, slunce v poledne září nažloutlým až bílým světlem.

Dalšími činiteli, které mohou ovlivnit kvalitu světla jsou objekty, které se před okny nacházejí. Např. zda slunce prosvítá skrze stromy, zda před okny není objekt jasné barvy, od kterého se paprsky odrážejí a pronikají oknem do místnosti, nebo zda do místnosti neproniká z venku ještě jiné světlo než sluneční, např. reflektory automobilů.

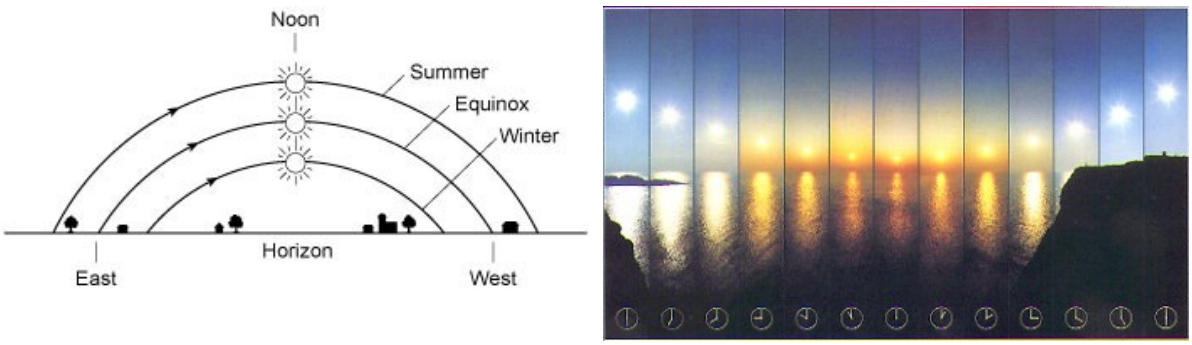
Výchozím jevem z předchozí škály zvolíme pohyb slunce po obloze. Tento jev přispívá největší měrou k celkovému osvětlení scény, můžeme jej jednoznačně popsat a zároveň zde půjdou ukázat záludnosti a problémy, které se při jeho modelování vyskytly. S různou polohou slunce se mění i vzhled místnosti. A to jak z hlediska barevného vjemu, tak i z hlediska velikosti intenzity.

3.1 Modelování denního světla

Nyní se zaměříme na to, jakým způsobem modelovat okno jako primární zdroj světelného záření. Nejdříve si popíšeme situace, kterou mohou nastat při pohybu slunce po obloze. V roli aktivních zdrojů světla vystupují slunce a také obloha. Slunce jako hlavní z této dvojice mění v průběhu dne svou polohu na obloze a v závislosti na tom také svou barvu. Otázku intenzity slunečního záření popíšeme v dalších kapitolách.

3.1.1 Slunce jako bodový zdroj

Z předchozí úvahy vyplývají dvě základní veličiny pro modelování slunce, tedy jeho poloha a barva. Pro popis polohy se omezíme na situaci pouze během dne, tedy polohu slunce vnímáme pouze v době od východu k západu. Souřadnicemi rozumíme výšku slunce na obloze (udávanou v úhlech) a úhel otočení vůči některé ze světových stran (nejčastěji vůči severu). Výška slunce (angl. *latitude angle*) se nejčastěji měří vůči zenitu. Pro snazší představivost a jednodušší pochopení budeme tento úhel počítat od horizontu, tj. $90-\theta$, kde θ je výška slunce ve stupních. Na následujícím obrázku 3.1 vidíte různé polohy slunce během ročních období a během dne. Na obr. 3.1b je také zachycen pohyb slunce při polárním dni včetně změny jeho barvy.



a) b)

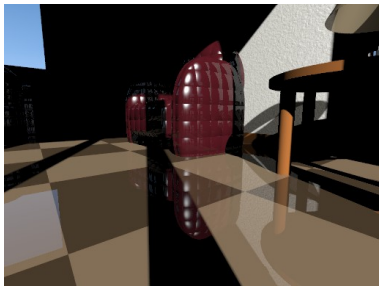
Obrázek 3.1: Pohyb slunce po obloze

Druhou složkou pro popis slunce jako světelného zdroje je jeho barva. Základní informace o barvě jsme probrali v kapitole 2.3. Pro slunce platí trochu odlišná pravidla. Výslednou barvu dostaneme také v systému RGB, nicméně získáme ji z hodnot, které odpovídají skutečnému popisu barvy z hlediska hustoty rozložení energie viditelného spektra.

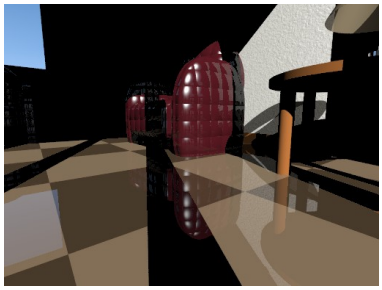
Dalším důležitým krokem je pro model slunce zvolit vhodný typ světelného zdroje. V úvahu připadají dvě řešení. Bodový a plošný zdroj světla. Oba typy mají pro naši potřebu své klady a zápory. Pro začátek si uvedeme některá fakta týkající se vzhledu a chování slunečních paprsků v přírodě. Slunce je hvězda vzdálená přibližně 150 mil. km od Země. Světlo musí tedy urazit velkou vzdálenost, než dopadne na zem. Budeme-li uvažovat, že světlo se šíří od Slunce rovnoměrně po kulových plochách do všech směrů, pak po určitém čase a uražené vzdálenosti se tyto plochy stanou rovnoběžnými. Jinými slovy úhel dopadu všech slunečních paprsků osvětlujících naši scénu je stejný. Tento předpoklad bude splněn v případě, že slunce modelujeme bodovým zdrojem světla umístěným v dostatečně velké vzdálenosti od zobrazované scény. Na druhou stranu má Slunce podstatně větší velikost než planeta Země. A i když vzdálenost mezi oběma tělesy je značná a velikost Slunce se při

pohledu ze Země zmenšuje, stále si ještě zachovává určitý rozměr. Proto bychom měli slunce modelovat jako plošný kulový zdroj světla.

Mezi oběma přístupy existuje jen několik rozdílů. V případě plošného zdroje se několikanásobně zvýší čas výpočtu, čímž ale získáme realističtější vzhled stínů, které mají ve skutečnosti měkký charakter. Bez tohoto detailu se ale můžeme obejít, protože scénu pozorujeme vždy z takové vzdálenosti, při které se nám přechod stínu a světla při přímém slunečním světle zdá jako ostrý, což můžeme bez problémů namodelovat pomocí bodového zdroje světla. Sníží se nám značně čas výpočtu na úkor drobného zhoršení kvality obrazu, které můžeme v tuto chvíli zanedbat. Detailně si tento jev můžeme prohlédnout na obrázku 3.2. Vlevo je obrázek zobrazený s plošným zdrojem světla o velikosti 1000x1000 s maticí bodových zdrojů o velikosti 20x20, který se nachází ve značně velké vzdálenosti. Toto má simulovat plošný charakter slunce. Avšak v porovnání s obrázkem vpravo, který představuje bodový zdroj světla, je rozdíl ve kvalitě zanedbatelný. Přitom čas výpočtu je dvojnásobný. Obraz měl velikost 512 na 384 obrazových bodů a doba zpracování byla v případě plošného zdroje 21,89s a v případě bodového zdroje 9,28s.



a)



b)

Obrázek 3.2: Rozdíl mezi plošným a bodovým zdrojem světla

3.1.2 Okno jako plošný zdroj

Předchozí postup funguje výborně, pokud ve scéně máme jedno okno, kterým do místnosti dopadá světlo ze slunce. V případě, kdy se ve scéně nachází několik oken orientovaných na různé světové strany, se situace poněkud více komplikuje. Dalšími okny do scény sluneční paprsky přímo nedopadají a přesto do místnosti toto okno přináší svůj díl světla. Na začátku kapitoly 3.1 jsme uvedli, že kromě slunce bereme v úvahu jako zdroj světla také oblohu. A právě obloha je zdrojem takového nepřímého osvětlení přicházejícím okny odvrácenými od slunce. Toto světlo vzniká rozptýlením slunečních paprsků v atmosféře, a proto je jeho směr náhodný a rovnoměrný po celé obloze.

Obloha je obrovská plocha, kde z každého jejího bodu vychází světlo rovnoměrně do všech směrů. Do scény však dopadne světlo jen z té části oblohy, ke které je okno natočeno. Na základě předchozích skutečností považujme okno za plošný zdroj světla. Barva takové plošného zdroje se odvodí od situace před oknem a na obloze a její konkrétní výpočet si představíme v kapitole 3.2.2.

Pokud bychom chtěli modelovat světlo přicházející okny pomocí jednoho světelného zdroje, pak musíme zkombinovat úvahy z předchozích částí dohromady. Tedy potřebujeme plošný zdroj, který bude vytvářet rozptýlené světlo oblohy a zároveň tento zdroj nasměrovat daným směrem pro simulaci přímého slunečního světla. Toho můžeme docílit tak, že plošný zdroj v okně vzdálíme více do prostoru. Podle potřeby upravíme velikost této plochy a zároveň využijeme směrových světelných zdrojů či nasměrování reflektorů (viz 2.2.2), abychom určili směr, kterým svítí slunce.

Tento postup vede ale k nechtěnému postrannímu efektu. Směrový zdroj nám dokonale nevytvoří skutečnost, že světlo z oblohy dopadá ze všech směrů. Použití reflektorů tuto chybu částečně odstraní, na druhou stranu ale nevytvoří správně dojem přímého slunečního světla a ve scéně vznikne oblast, která je více světlá, než by mělo být, a stíny jsou velmi měkké, což nevyhovuje podmínkám přímého osvětlení (obr 3.3a). Obě varianty dávají nerealistické výsledky a pro další práci je nebude možné použít.

a)

b)

Obrázek 3.3: Chyby při výpočtu osvětlení

3.1.3 Kombinace bodového a plošného zdroje

Kompromisem se zdá být následující idea. Scénu osvícenou pouze přímými slunečními paprsky zobrazíme pouze s primárním osvětlením. Při použití metody sledování paprsků spočítáme pouze primární paprsky od zdroje. Tím nám vzniknou ostré stíny a intenzivně osvětlená plocha ve scéně, na kterou dopadá světlo ze slunce.

Použití metod globálního osvětlení (např. radiozity) není v tomto případě příliš vhodné. Z experimentů vyplývá několik důvodů. Vzdálenost mezi zdrojem světla a scénou je příliš velká a velikost celé scény v porovnání s touto vzdáleností je velmi malá. To vede k tomu, že při výpočtu

radiozity dochází k chybám, které se projeví nerealistickými artefakty objevujících se na plochách ve scéně (viz obr 3.3b). Sice by se tento problém dal vyřešit vhodným nastavením algoritmu. To by ale znamenalo velmi značné navýšení výpočetního času a ještě bychom nedosáhli odpovídajících výsledků.

Další částí úvahy je modelovat světlo přicházející z oblohy jako plošný zdroj umístěný v celé ploše okna. Zde už metody globálního osvětlení fungují správně. Z tohoto plošného zdroje se světlo šíří rovnoměrně do místnosti, jeho barva je úměrně nastavena a intenzita snížena tak, aby odpovídala skutečnosti. Protože při přímém slunečním světle se zdají být předměty jasnější než při rozptýleném světle.

Na závěr oba takto vytvořené obrázky sečteme. Modelový příklad vidíme na obrázku 3.4. Tento postup se zdá být více než vhodný pro další práci a nastavování světelných podmínek. Díky němu dokážeme zachytit jak přímé sluneční světlo, tak světlo z oblohy, a to z jakékoliv světové strany, nehledě na počet a rozmístění oken. Bude-li okno orientováno směrem ke slunci, dopadne jeho světlo do scény. V opačném případě se použije pouze světlo z okenního zdroje. Navíc každý ze světelných zdrojů můžeme nastavovat zvlášť, resp. vytvořit pro ně oddělené sady parametrů, a tím docílit ještě větší rozsahu z hlediska proměnného osvětlení.

a) b) c)

Obrázek 3.4: Sčítání jednotlivých druhů osvětlení do výsledného obrazu

3.2 Modelování barvy světelných zdrojů

V předchozí kapitole jsme rozebírali základní parametry pro popis slunce a oblohy jako hlavních světelných zdrojů. Kromě polohy a typu zdroje byla zmíněna také barva. V této kapitole si postup definování barev popíšeme detailněji.

3.2.1 Nepřímé osvětlení

V kapitole 2.5.2 jsme si ukázali postup, pomocí kterého lze matematicky definovat barevný vzhled oblohy. Celkový vzhled je odvozen od polohy slunce a jednotlivé body oblohy se potom počítají v závislosti na této poloze. Díky tomuto modelu získáme vizuální znázornění oblohy při aktuální

poloze slunce na obloze, které můžeme použít při zobrazování scény. Můžeme také získat barvu každého bodu oblohy a to pouze pomocí úhlových souřadnic.

Tento postup se dá celkem úspěšně praktikovat při definování barev nepřímého osvětlení z oblohy. Na rozdíl od definování barevné teploty nám tato metoda přináší výhody v tom, že vzhled oblohy se mění se změnou polohy slunce a tedy pro každou polohu slunce existuje jediný postup pro výpočet nepřímého osvětlení, protože používáme stejný analytický model. Takový vztah by se u barevné teploty hledal těžko a nebo bychom ho museli uměle a nejspíš také složitě vytvořit.

Nejprve by bylo vhodné se zamyslet, proč nepřímé osvětlení řešit tímto způsobem. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.5.1, světlo přicházející z oblohy může mít různou podobu. Vynecháme-li přímé světlo ze slunce, pak ještě zůstávají dvě situace. To je zatažená obloha a nepřímé osvětlení, kdy slunce za jasného počasí není hlavním zdrojem světla. Obě tyto situace mají jedno společné. Světlo, které vstupuje do scény, má výhradně difúzní charakter, přichází ze všech směrů a jediný rozdíl mezi nimi je barva světla. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.5.1, barva světla závisí pouze na vzhledu oblohy. A právě díky matematickému modelu tento vzhled máme jasně definován a můžeme jej tedy použít pro výpočet barvy.

3.2.2 Výpočet barvy

Obloha mění svůj vzhled nejvíce v blízkosti slunce. Na straně odvrácené od slunce již tato změna není tak patrná. Navíc, pokud nás zajímá nepřímé osvětlení, pak nejčastěji toto osvětlení pochází z té části oblohy, která je naproti slunci. Proto pro výpočet barvy použijeme právě tuto část oblohy. Úhlové souřadnice potřebných bodů budou ležet přesně naproti souřadnicím polohy slunce (viz obr. 2.2). Další předpoklad je ten, že každý bod oblohy nemá stejný vliv na osvětlení ve scéně. Největší vliv mají body ležící v úrovni okna. Se zvětšujícím se úhlem od horizontu se vliv zmenšuje.

- **Postup výpočtu barvy**. Spočítáme hodnotu barvy na horizontu a postupně zvětšujeme úhel až k zenitu a sčítáme jednotlivé barvy. Každou z nich vynásobíme kosinem úhlu, abychom snížili vliv bodů oblohy výše od horizontu, viz následující ukázka pseudokódu:

```
BarvaOblohy = <0,0,0>; // cerna barva
while ( uhel < 90 ) {
  NovaBarva = barva oblohy na pozici 'uhel' odvracene od slunce;
  BarvaOblohy = BarvaOblohy+NovaBarva*cos(uhel);
  uhel += konst;
}
BarvaOblohy = BarvaOblohy/PocetIteraci;
```

Trochu odlišná situace nastane, pokud potřebujeme zobrazovat zároveň přímé a nepřímé osvětlení, jak je popsáno v kapitole 3.1.3. Při přímém světle ze slunce má slunce majoritní vliv na barevný vzhled scény. Když ale budeme modelovat zvlášť přímé a nepřímé světlo, pak potřebujeme

pro každou část nastavit zvlášť také barvy. U slunce problém není, protože barva slunce se odvozuje od barevné teploty. Trochu komplikovanější je situace v případě nepřímého osvětlení. Zde použijeme stejný postup popsaný výše, ale zároveň do výpočtu musíme zahrnout většinový podíl barvy slunce. Tedy k vypočítané hodnotě z odvrácené strany oblohy přidáme ještě „několikrát“ barvu slunce. Tím docílíme realistické barvy nepřímého světla na straně slunce.

Dalším faktorem, který v sobě analytický model zahrnuje, je do jisté míry určování stavu oblačnosti. Při výpočty barvy se uvažuje konstanta „zakalenosti“ oblohy (angl. *turbidity*). Ta nám udává míru toho, jak se sluneční paprsky rozptylují v atmosféře. Při vysoké hodnotě dojde k tomu, že obloha dostane podobu zcela zatažené oblohy. Podle toho se změní také její barva na modrošedou až šedou. Při aplikaci výše zmíněného postupu obdržíme nepřímé osvětlení ze zatažené oblohy. Jediná drobná úprava, na kterou musíme pamatovat, je snížení intenzity světla. Protože při zatažené obloze nebude zřejmě světlo tak intenzivní jako při jasné obloze.

3.3 Modelování zatažené oblohy

V kapitole 3.1.1 jsme popsali rozdílné způsoby modelování slunce. Výsledkem této úvahy je použití bodového zdroje kvůli úspoře výpočetního času. Nicméně existují situace, kdy by bylo velmi vhodné použít plošný světelný zdroj.

Zejména je to důležité kvůli větši realitičnosti, protože slunce má přecejen nějakou plochu, která i při přímém osvětlení vytváří měkký přechod stínů. Navíc při použití plošného zdroje se dají snáze produkovat snímky s komplexnějšími změnami osvětlení. To ve skutečnosti znamená, že lze najít vztah mezi velikostí plochy světelného zdroje a osvětlením z oblohy.

Pokud je slunce při pohybu po obloze zakryto například mrakem, pak tento mrak rozptýlí paprsky, a osvětlení se tím pádem změní. Rozptylem paprsků dojde k tomu se zvětší plocha, ze které paprsky vycházejí, a zároveň se společně s tím sníží intenzita světla. Nicméně velikost této intenzity je stále větší v porovnání se zbývající částí oblohy. Pro osvětlení a vzhled scény to znamená, že stále zůstanou patrné stíny, které vrhne takové světlo. Tyto stíny budou o poznání více měkké, protože plocha světelného zdroje se díky rozptylu světla zvětšila. Na druhou stranu rozdíl v intenzitě mezi osvětlenou a neosvětlenou částí se zmenší, což znamená, že slunce nebude tolik zářit a dojde ke snížení jasu plochy, kterou v místnosti osvětluje. Pokud mraků bude přibývat, dojde k většímu rozptylu paprsků a v důsledku toho budou vznikat více měkké stíny a intenzita se bude stále zmenšovat. V konečné fázi, při rovnoměrné zatažené obloze, získáme pouze nepřímé osvětlení.

Popsali jsme si postup, pomocí kterého modelujeme míru zataženosti oblohy. Tento postup zavisí na dvou parametrech – na velikosti intenzity a na velikosti plochy světelného zdroje. Intenzita se mění od nejvyšší, která připadá na přímé osvětlení od slunce, až po minimální, která odpovídá

intenzitě scela zatažené oblohy. Plocha světelného zdroje se pohybuje od téměř bodové velikosti až po plochu celé oblohy. Při tomto krajním případě se již světelný zdroj ignoruje, protože by jeho velikost musela být srovnatelná z celou oblohou a navíc intenzita světla je tak nízká, že již toto světlo nemá žádný efekt na vzhled scény.

Díky tomuto jednoduchému vztahu lze intenzitu a velikost plochy měnit podle parametru udávající míru oblačnosti. Jednotlivé hodnoty parametrů pak mohou odpovídat nějaké hodnotě funkce reprezentující rozložení intenzity a velikosti plochy. Tyto funkce mohou být pro začatek lineární. Nicméně z pozorování vyplývá, že změny těchto hodnot nemají zcela lineární charakter. Tato drobná odchylka se však vyřeší pouhou změnou funkce.

4 Osvětlení v nástroji POV-Ray

Následující kapitola se bude plně věnovat popisu vytváření experimentů se změnami osvětlení. Představíme si program, pomocí kterého bylo možné teorii ověřit v praxi. Popíšeme si základní rysy programu. Hlavně si ukážeme programové konstrukce, které směřovaly k ověření postupů z předchozích kapitol.

4.1 Popis programu

POV-Ray[1] (z angl. ***P**ersistance **o**f **V**ision **Ray**tracer*) je grafický nástroj pro vytváření trojrozměrných fotorealistických snímků. Tento program má otevřený zdrojový kód a je podporován a vyvíjen nemalou komunitou nadšenců. Pro vykreslování používá především metodu sledování paprsků (raytracing, viz kap. 2.1.2).

Scéna je popsána v textovém souboru. Do něj se zapíší informace o objektech ve scéně, definice jejich tvaru, rozmístění a nastavení materiálů, popis osvětlení a nastavení pohledové kamery. Program tento soubor zpracuje a následně zobrazí hotový obrázek. Jazyk pro popis scény (z angl. *scene description language, SDL*) je velmi jednoduchý a zcela intuitivní. Kromě jazyka scény obsahuje POV-Ray také základní programové řídící struktury jako cykly, podmíněné výrazy apod. Díky nim se mohou při vytváření scény uplatnit jednoduché programové konstrukce, které rozšíří možnosti programu a umožní vytvářet složitější scény. Ukázka výstupu programu je na obrázku 4.1.

Obrázek 4.1: Populární obrázek zobrazený nástrojem POV-Ray

1 http://www.povray.org/

POV-Ray navíc obsahuje spoustu dalších metod a postupů počítačové grafiky. Kromě různých zobrazovacích metod (radiozita, fotonové mapy atd.) můžeme také pro vytváření složitých objektů použít CSG (z angl. *constructive solid geometry*) [5]. Součástí distribuce bývají také knihovny dalších tvarů, objektů a materiálů, nebo lze tyto doplňkové části nalézt na internetu.

4.1.1 Jazyk pro popis scény (SDL)

Jazyk sám o sobě je velmi jednoduchý. Scéna se vytváří buď ze základních 3D primitiv (koule, kvádr, válec, kužel, torus apod.), nebo ze složitějších objektů (Beziérovy plochy, implicitní plochy, polygonální sítě atd.). Zápis se potom skládá z názvu objektu, definování jeho tvaru a velikosti a specikace umístění ve scéně. Např.:

```
sphere {
    <0, 1, 2>, 2
    texture {
      pigment { color Yellow }
    }
  }
```

Důležité pro výsledný vzhled je nastavení optických vlastností objektu. To se skládá z definování barvy nebo textury, odrazivých vlastností a materiálu. Toto nastavení hraje důležitou úlohu při zpracovávání scény některou ze zobrazovacích metod, protože na něm závisí, jak daný objekt bude vypadat.

Všechny objekty mohou být zpracovávány pomocí CSG. Tohoto postupu se využívá docela často, protože se tak ušetří spousta času a práce. Například mužeme sjednotit několik objektů do jedné skupiny a s ní pak pracovat jako s jedním celkem. Operace vykonané nad skupinou se provedou nad každým jednotlivým objektem, např. pokud chceme hromadně posunovat několik objektů, které spolu souvisí. Nebo potom pomocí rozdílů dvou těles získáme tvary, které bychom jinak složitě vytvářeli, např. okno ve zdi.

Možnosti jazyka jsou velmi různorodé. Kromě definování geometrie scény můžeme také popsat např. atmosférické jevy (mlha, duha atd.), využít částicového systému k modelování kouře nebo pomocí metody vrhání fotonů modelovat odlesky skrz průhledné materiály atd. Všechny funkce mají své názvy, které vycházejí z přirozeného jazyka. Jejich použití se tím ještě více zjednoduší.

4.1.2 Světelné zdroje

Se světelnými zdroji se v nástroji POV-Ray pracuje stejným způsobem jako z běžnými objekty. Musíme definovat typ světelného zdroje a jeho umístění. Můžeme jej také zpracovávat společně s dalšími objekty pomocí CSG.

POV-Ray umí pracovat se všemi druhy světelných zdrojů, jak jsme je popisovali v kapitole 2.2. Navíc každý z nich má své specifické parametry pro dosažení velmi komplexních výsledků osvětlení. Pro naše experimenty jsme hlavně nastavovali barvu a intenzitu světelného zdroje. Jednotlivé typy zdrojů jsme volili podle způsobu jejich použití.

4.2 Nastavení scény

Společně s nástrojem POV-Ray použijeme pro správu světel a světelných zdrojů knihovnu LightsysIV[2]. Tato knihovna v sobě obsahuje, kromě sady maker pro světelné zdroje, také funkce pro převod barvy mezi různými systémy, funkce pro správné nastavení barevného vyvážení a spoustu předzpracovaných hodnot intenzit, barevných teplot a spekter pro realistické barvy světelných zdrojů a materiálů.

V následujícím textu si vysvětlíme některé problémové situace, které v průběhu experimentů nastaly, a způsob jejich řešení s použitím prostředků programu POV-Ray.

4.2.1 Specifika scény

Společně s knihovnou LightsysIV je distribuováno také několik vzorových scén, na kterých je představen základní princip použití knihovny. Tyto scény tvoří výborný základ pro zahájení experimentů, nicméně je nutné je pro naše potřeby upravit. První důvod je, abychom v co největší míře postihli všechny situace, které mohou při změnách osvětlení nastat. Za druhé, aby se výsledným produktem těchto experimentů stalo krátké video. Pro tento účel použijeme funkci programu POV-Ray, která nám umožní vytvořit sérii snímku pro animaci.

U první úpravy vycházíme s předpokladu, že světlo do scény může skrze oblohu přicházet ze všech stran. Tedy i okna místnosti by měla být otočena na různé strany. Pro názornost postačí, když v místnosti vytvoříme okna orientovaná každé na jinou stranu. Zajímavé efekty také vznikají, když světlu stojí v cestě nějaký užší objekt. Stín, který takový objekt vhrne, se velmi rychle mění v závislosti na změně zdroje světla. Protože hodláme pracovat většinou s plošnými světelnými zdroji, úzký objekt, který je takovým světlem osvícen, vrhá velmi měkké stíny. A právě tyto stíny nám dokáží mnohé prozradit o stavu osvětlení. Ostatně stejně to funguje i ve skutečnosti. Pro reprezentaci takového úzkého objektu zvolme například sloupky na jedné straně místnosti.

Poslední hlavní změnou je úprava světelných zdrojů. V místnosti je obvykle nadefinován zdroj světla reprezentující okno. Ten musí projít větší úpravou. Konstatní hodnota barvy a intenzity musí být nahrazena námi vypočítanými hodnotami, které získáme aplikováním postupu z kapitoly 3.2.2. Toto nastavení musí být zcela univerzální, abychom bez větších zásahů do zdrojového kódu scény

2 http://www.ignorancia.org/

mohli zobrazovat místnost s proměnným osvětlením. Následující ukázka kódu popisuje nastavení plošného zdroje světla se všemi parametry, které jsou potřeba při změnách osvětlení. Kromě okna musíme ještě dodat zdroj světla pro slunce. Pro něj platí stejné podmínky. Kromě intenzity a barvy se mění také i velikost zdroje. Tyto změny zavisí ale na jiných parametrech, zápis je však téměř totožný.

```
light_source{ 0
  Light_Color(WindowColor,OvercastMult*(100+1100*SW_RotCoef(Az, 270)))
  #if (use_area)
  area_light 140*z, 120*y, 7, 6 jitter adaptive 1
  #end
  Light_Fading()
}
```

Vysvětlení důležitých parametrů světelného zdroje:

- `WindowColor` – barva světelného zdroje spočítaná z analytického modelu
- `OvercastMult` – míra oblačnosti; interval od 0 (zcela jasno) do 1 (zcela zataženo)
- `SW_RotCoef` – vztah orientace okna (270 - západ) vůči rotaci slunce `Az`

4.2.2 Výpočet barev

Světelné zdroje si v místnosti můžeme rozdělit do dvou kategorií. Na světelné plošné zdroje v oknech a na slunce. Důvod je ten, že u slunce budeme zobrazovat pouzé přímé osvětlení, kdežto u okenních zdrojů světla provedem kompletní výpočet globálního osvětlení.

Důležitou roli hraje knihovna LightsysIV, kde se použije analytický model oblohy (viz kapitola 2.5.2) a výpočítá se polokoule reprezentující oblohu. Tato polokoule je tvořená sítí trojúhelníků a pro každý vrchol trojúhelníku byla z analytického modelu odvozena barva. Navíc díky jednoduchým geometrickým vztahům v modelu můžeme jednoduše zjistit barvu libovolného bodu polokoule. Musíme jen znát polohu slunce a potom úhlové souřadnice daného bodu. Barva je vypočtena v systému CIE XYZ, ze kterého pak převodem získáme RGB barvu. Navíc veškeré výpočty berou v úvahu aktuální barevné vyvážení scény. Sčítáním barev od horizontu k zenitu získáme barvu světla, které proniká skrz okna.

Nastavení barvy u slunce je relativně jednoduché. Při jasné obloze má barva při východu a západu hodnotu 2500K. V poledne je hodnota barvy 5500K. Podle stupně oblačnosti se mění také rozsahy barev. Předpokládáme tedy, že se barva bude při pohybu slunce od východu na západ měnit z 2500K na 5500K. Horní hranice nastane v poledne a potom bude barva klesat zpět. Vždy se jedná o dvě hodnoty barevných teplot, kde první z nich udává barvu při východu (západu) slunce a druhá barvu v poledne. Podle stupně oblačnosti se mění také interval hodnot. Jelikož je pro oblačnost charakteristické, že veškeré světlo má bílou barvu, tak interval barevných teplot se zúží. Jeho rozsah pro zcela zataženou oblohu bude od 6000K do 7500K.

Určujícím faktorem pro výběr barvy je výška slunce na obloze, protože s nižší výškou získává slunce více oranžovou barvu. Při vytváření animace se v každém čase spočítají souřadnice slunce na obloze a podle výšky se určí jeho barva:

```
#declare Cl_Sunlight =
  Blackbody(FirstTemp+(sun_altitude/max_sun_altitude)*
  (SecondTemp-FirstTemp));
```

kde `FirstTemp` a `SecondTemp` jsou hranice intervalů barevný teplot a podíl určuje aktuální poměrnou část výšky slunce.

Původní záměr byl hodnotu barvy určovat podle času animace. Pokud bychom zkoumali jenom jasnou oblohu, tak by v tom nebyl problém. Nicméně kromě jasné oblohy provádíme experimenty také se zataženou oblohou, např. simulace mraku zakrývající slunce. V tomto případě pohybující mrak zakrývá slunce. Poloha slunce by tedy zůstávala stejná, barva by se ale nepřirozeně měnila a výsledek by vypadal nerealisticky.

Barva slunce také ovlivňuje světlo přicházející do místnosti skrz okna (kap. 3.2.2). Pokud je okno natočeno ke slunci, pak přičtení barvy slunce k barvě světla v okně vyhovuje. Horší situace nastane, když okno je od slunce odvráceno. Zde se kromě barvy mění také intenzita. A právě intenzita závísí na tom, do jaké míry je slunce od okna odvráceno. Přes den není rozdíl příliš velký. Zřetelněji je tento jev pozorovatelný při východ a západu slunce. Máme-li okna otočena na jednu z těchto stran, pak vycházející (zapadající) slunce svítí do místnosti přímo a místnost je světlá. Na odvrácené straně panuje šero a místnosti jsou o poznání tmavější. Z toho důvodu je nutné zkoumat vztah mezi orientací oken a rotací slunce.

Orientaci okna určíme pomocí jeho normály. Důležitým měřítkem je úhel rotace slunce, na který normála směřuje. Úhel rotace slunce má počátek na severu. Ostatní světové strany potom leží na úhlech 90°, 180° a 270°. Pokud okna jsou otočena na východ, pak jejich normály směřují na úhel 90°. Slunce se v ideálním případě, od východu na západ, pohybuje po úhlu rotace od 90° do 270°. Absolutní hodnota rozdílů tohoto úhlu s úhlem, na který je orientováno okno, nám udává míru odvrácení slunce a okna. Na této hodnotě pak závisí celková intenzita světelného zdroje v okně. Viz následující ukázka kódu:

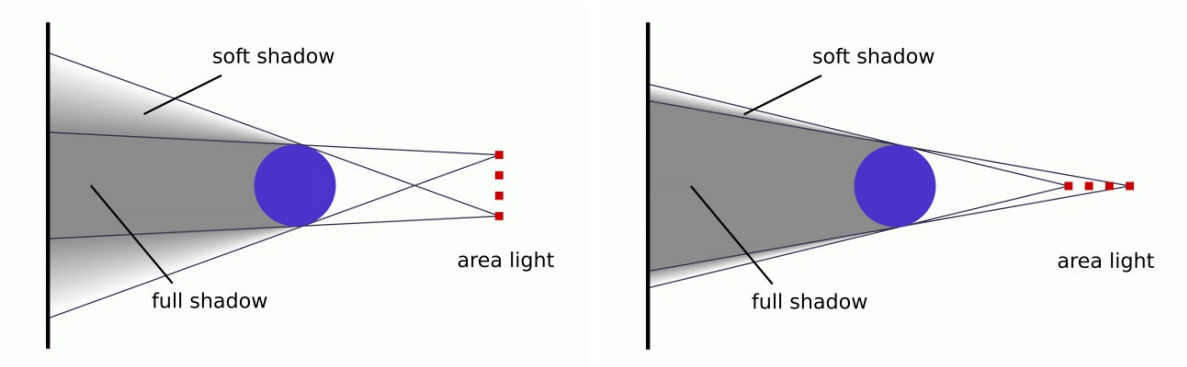
```
#macro SW_RotCoef(Az, WinOr)
  (1 - abs(WinOr-Az)/180)
#end
```

kde `WinOr` je úhel orientace okna, `Az` aktuální rotace slunce.

Jasná obloha je relativně jednoduchá na modelování. Pracuje se zde hlavně s barvami a většinou můžeme vztahy mezi veličinami považovat z jistou mírou abstrakce za lineární. Se

zvětšováním oblačnosti se radikální mění i osvětlení. Pokud slunce zakruje mrak, dojde ke snížení intenzity světla a v závislosti na složení mraku dojde k rozptylu světla. Navíc, obloha pohltí některé vlnové frekvence, což způsobí změnu barvy. Barevný rozsah při zatažené obloze nebývá tak velký. Teplota barvy se pohybuje velmi blízko standardu bílé barvy, tj. 6000K-7500K.

Z hlediska změny vlastností světelného zdroje dojde k tomu, že se změní jeho barva, sníží se intenzita a hlavně se změní jeho velikost. Světlo září s menší intenzitou, ale z větší plochy. Plošný zdroj vytváří měkké stíny, které se mohou pozorovat na stínech od sloupů, jak jsme to popsali v předchozí kapitole. Nástroj POV-Ray nabízí zvláštní nastavení plošného zvětelného zdroje, které se pro případ zatažené oblohy velmi hodí. Pomocí klíčového slova *circular* definujeme kruhový tvar světelného zdroje. Za prvé to více odpovídá skutečnému tvaru slunce a kruhový zdroj vytváří v některých případech realističtější stíny. Druhým důležitým parametrem je *orient*. Tímto nastavíme světelnému zdroji tu vlastnost, že vždy bude natočen celou svou plochou k bodu, který osvětluje (viz obr. 4.2). Důvody pro použití tohoto parametru jsou stejné jako v předchozím případě.



Obrázek 4.2: Rozdíl v orientaci světelného zdroje

Nicméně i zde můžeme najít vztahy mezi jednotlivými parametry nastavení. V případě jasné oblohy se vše řidilo podle polohy slunce. V případě zatažené oblohy bude rozhodujícím činitelem míra oblačnosti. Dokud není zcela zataženo, pak předpokladejme, že část oblohy, kde se nachází slunce, září jasněji (s větším intenzitou) než zbýlá část. Stále jsou patrné měkké stíny, a proto je nutné slunce modelovat, i když s nižší intenzitou a velkou plochou světelného zdroje. Vztah mezi mírou oblačnosti a velikostí intenzity chápejme jako exponenciální. Pokud slunce zakryje mrak, intenzita záření velmi rychle klesá. Na druhou stranu velikost plochy zdroje se může měnit lineárně.

Co se týče barvy světelných zdrojů, tak plošné zdroje v oknech se stále počítají z analytického modelu, u kterého se jen zvýší míra zakalenosti (turbidity), aby nebe získalo šedivější barvu. Při úplném zatažení je okno jediný zdroj světla v místnosti. Slunce už můžeme ignorovat, protože přestalo mít na scénu vliv.

Jediné, na co je nutné brát u slunce zřetel, je jeho barva. Ta se vzhledem k rostoucí oblačnosti mění pomalu, až při dostatečně velké oblačnosti se barva slunce nastaví na teplotu odpovídající zatažené obloze, tedy v rozsahu 6000K-7500K. Tedy barva a intenzita slunce mají zcela odlišný průběh. Intenzita exponenciálně klesá, naproti tomu barevná teplota slunce exponenciálně stoupá k vyšším hodnotám.

4.2.3 Animace

Nástroj POV-Ray má v sobě funkci pro vytvoření série snímků s předem definovým formátem. Pro vytvoření výsledného videa budeme muset použít další externí nástroj, který nám se snímků video vytvoří. Navíc je potřeba snímky s přímým osvětlením a s nepřímým osvětlením sečíst, což také POV-Ray neumí. Pro tento účel uplatnil svou všestranost program Matlab. Ten pomůže jak se sčítáním obrázků, tak s vytvořením videa.

POV-Ray využívá inicializačních textových souborů a argumentů příkazové řádky k nastavení parametrů animace. Zde, mimo jiné, musíme nastavit počet snímků a interval hodin. Povolíme-li animaci a všechny její parametry jsou nastaveny správně, pak máme ve zdrojových textech k dispozici proměnnou `clock`. Její hodnota se s každým novým snímkem zvýší. Tuto proměnnou pak můžeme použít v nastavení objektů a vlastností scény, které chceme, aby se měnili.

Pro pohyb slunce po obloze chceme, aby se měnila jeho poloha. Při deklarování polohy přidáme k této proměnné hodnotu `clock`, která bude vychozí hodnotu pozice zvyšovat až k námi zvolenému maximu.

4.3 Výsledky experimentů

Než se přistoupilo k experimentům týkajících se tématu této práce, bylo nutné se nejdříve naučit používat nástroj POV-Ray. Na první pohled vypadá velmi nebojácně, avšak skrývá v sobě velkou sílu. Abychom mohli využít jeho potenciál, tak je nutné strávit trochu času a naučit se s ním pracovat. Hodně v tom pomohla kvalitní příručka a návod [17][18] a také spousta vzorových ukázek aplikace.

Nyní již přistupme ke zhodnocení výsledků této práce a experimentů. Přes prvotní předpoklady se nám řešení poněkud zkomplikovalo. Počítalo se jen s drobnými obměnami zaběhlých metod modelování světla. Nicméně se zjistilo, že změna osvětlení spolu nese spoustu překážek.

Nejdůležitějším výsledkem experimentů je rozdělení denního světla na dva druhy, přímé a nepřímé, a každé z nich modelovat zvlášť. Protože na začátku se ukázalo, že i když existuje jen jedno Slunce, tak jeho účinek je natolik rozmanitý a produkuje tolik rozdílných druhů osvětlení, že nelze modelovat jedním způsobem. Výsledky této metody jsou více než ucházející. Zatím se pohybujeme na experimentální rovině. Podařilo se nalézt metodu, která funguje, což už samo o sobě

je úspěch a zároveň nová cesta pro další budoucí výzkum. Nastavení parametrů také není postaveno na pevných základech a občas jsou jejich hodnoty nastavovány náhodně. Nadpoloviční většina ale vychází z již existujících a ověřených studií. Tyto by se měly stát základními pilíři dalšího vývoje.

Samozřejmě je nutné podotknout, že i tato metoda má svá pro a proti. Bohužel se jedná jen o hrubý nástin toho, jak by se proměnlivé osvětlení mělo modelovat. Každopádně i v tomto neuhlazeném řešení lze najít některá pozitiva.

Výhody. Největší výhodou této práce je poznatek, že pro změnu velké části osvětlení, kterou produkuje slunce a obloha, stačí jen minimální počet parametrů. Přesněji řečeno vše závisí na poloze slunce na obloze a na stupni oblačnosti. Vše ostatní lze dopočítat ať už pomocí složitého analytického výpočtu nebo jen jednoduchými početními operacemi. Potom stačí jen drobně poupravit jeden parametr a výsledný obraz výpadá úplně jinak.

Dále je dobré si uvědomit, že se stále pracuje se světlem. Jeho fyzikální podstata je jasná a nemění se nějak výrazně mezi jednotlivými zdroji světla. Pokud by se ten skutečný princip šíření světla a fyzikálních vlastností zabudoval do této aplikace, tak by opravdu stačilo málo k zobrazování složitých jevů.

Není tajemstvím, že matematika je přesná věda. Pokud se někde objeví matematický popis, je to známka toho, že výsledek bude velmi přesný. V oblasti šíření světla a počítačové grafiky se matematika používá velmi často, a tak pokud by se některé náhodně zvolené hodnoty namodelovaly matematickými funkcemi, není pochyb o naprosto přesném výsledku.

Nevýhody. Avšak existuje také několik záporných omezení. Některé z nich jsou způsobeny vinou hrubých experimentů. Jsou ale takové, které půjdou jen těžko odstranit. Největší nevýhoda je v obrovské časové náročnosti, protože výpočet jednoho snímku v lepší kvalitě trvá i několik desítek minut. A pro vytvoření i třeba krátkého video bychom museli čekat několik dní. Samotný POV-Ray při své velké síle také neumí vše a bylo nutné používat další externí nástroje pro zhotovení koncového videa. Pokud by se něco takového ujalo v praxi, bylo by zřejmě nutné vyvinout specializovaný software.

Celkový výsledek ovšem vyznívá velmi kladně. Podařilo se vytvořit konečnou animaci a nastavit scénu a světelné zdroje tak, aby ke změnám osvětlení docházelo jednoduchou úpravou. Na závěr hodnocení výsledků můžeme konstatovat, že realisticky zobrazit budovu s proměnným osvětlením lze, i když původní předpoklady byly jiné, nakonec se dospělo k vydařenému závěru.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat metody a prostředky, kterými lze realizovat změnu světelných podmínek ve scéně. Experimenty měly být prováděny na vhodně zvolené budově, protože se zde předpokládá, že ke změnám osvětlení bude docházet velmi často. Výsledným produktem se mělo stát krátké video zobrazující měnící se osvětlení.

Práci zahajilo studium prostředků, které se přímo dotýkají světelných vlastností scény. Těmito prostředky rozumějme především světelné zdroje a jejich vlastnosti, protože právě změna těchto vlastností způsobí změnu osvětlení. V budovách hraje hlavní roli při konečném osvětlení denní světlo. Při prvních experimentech se zjistilo, že základní znalosti o světelných zdrojích jsou nedostačující pro modelování takového jevu, jakým denní světlo je.

Slunce a denní světlo se stalo klíčovým tématem této práce a to hned z několika důvodů. Slunce je hlavní zdrojem světla v budově, a proto největší měrou ovlivňuje světelné podmínky uvnitř scény. Navíc slunce vytváří rozmanité druhy světla, které do místnosti dopadají ať už přímo ze slunce nebo nepřímo z oblohy, a jsou vhodným kandidátem pro tuto práci. Už jenom to, že slunce během dne mění svou polohu na obloze, se do velké míry projeví také na vzhledu místnosti. Pokud ještě k tomu přidáme změnu barvy při východu a západu slunce a také různou míru oblačnosti, dostane spoustu jevů, které můžeme modelovat. I když se zdá, že pro každý tento jev je charakteristické jiné nastavení světelných zdrojů, tak ve skutečnosti jsou všechny jevy na sobě závislé, avšak tato závislost nebyla na první pohled zpočátku vůbec patrná. V průběhu experimentů se podařilo definovat vztah mezi jednotlivými změnami osvětlení a implementovat metodu, kterou lze tyto změny kontrolovat a jednoduše zobrazovat. Tato metoda spočívá v odděleném zpracování přímého a nepřímého světla ve scéně s tím, že výsledky jedné části jsou závislé na výsledcích části druhé. Spojením výsledků, v tomto případě dvou obrazů, získáme jeden konkrétní snímek.

K zobrazování byl použit nástroj POV-Ray, který ze zadaného textového popisu scény dokáže s použitím metod realistického zobrazování vytvořit kvalitní snímek. Zde jsme se zaměřili na nastavení světelných zdrojů a možnosti změn jejich vlastností za účelem vytvoření animace. Nastavování parametrů probíhalo zpočátku zcela náhodně, až po definování závislostí jednotlivých světelných podmínek mezi sebou se přistoupilo k popisu pomocí realných hodnot, nebo hodnot získaných ověřeným výpočtem. Navíc bylo nutné strávit spoustu času pozorování reálného světa, protože vždy, když obraz působil nerealisticky, bylo zapotřebí popsat tuto nesrovnalost a uvést ji na správnou míru. Nebýt této vzájemné konfrontace, jistě by některé detaily zůstaly opomenuty a jejich absence ve výsledné animaci by způsobila nepřirozený vzhled celé scény.

Výstupem této práce je krátké video, na kterém je naznačen postup vytváření obrazu a několik krátkých animací s proměnnými světelnými podmínkami. Snímky pro toto video byly generovány přímo z nástroje POV-Ray. Veškeré zdrojové obrazy budou k dispozici na přiloženém médiu, ale pokud by bylo potřeba, pak z předchystaných skriptů lze tyto snímky znovy vygenerovat. V této jednoduchosti se projevuje smysl této práce. Ve skriptech změníme jen několik málo proměnných a ihned dostaneme obrazy s různými světelnými podmínkami. Můžeme tedy říct, že cíl práce byl splněn. Popsali jsme charakteristické světelné podmínky v budově a experimentálně ověřili metodu, která umí simulovat změnu těchto podmínek a jednoduchým způsobem je ovládat a měnit.

Tento projekt by mohl najít své uplatnění například průmyslu při designu budov, kanceláří a bytů. Jistě by nebylo na škodu prohlednout si navrhnutý objekt při různých světelných podmínkách, aby pak zákazník nebyl překvapen, když ve finále zjistí, že skutečnost se jefí jinak, než jak m u byla prezentována projektanty.

Dalším pokračováním projektu by mohlo být úplný přesný popis všech vlastností, které zasahují do výsledného obrazu. Možná by stálo za snahu se pokusit přecejen zkombinovat zobrazení přímého a nepřímého zdroje do jednoho univerzálního, který by například fungoval na principu matice bodových zdrojů, kde by byl každý bod charakterizován funkcí, která by určoval svítivost v určitých směrech včetně barevných složek. Tím by se dal vyřešit problém jak s ostrým tak difúzním světlem.

Literatura

[1] Jensen, H. W. Realistic Image Synthesis using Photon Mapping, AK Peters, 2001

[2] Čadík, M. Vizualizace světelného zatížení, diplomová práce, ČVUT v Praze, 2002

[3] Whitted, T. An improved illumination model for shaded display, Communications of the ACM 23(6), June 1980

[4] Phong, B. T. Illumination of computer generated pictures, Communications of the ACM 18(6), June 1975

[5] Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P. Moderní počítačová grafika, Computer Press, 2004

[6] Ryer, A. The light measurement handbook, International Light, 1997

[7] Nishita T. Nakamae E. Continuous tone representation of three-dimensional objects illuminated by sky light, Communications of the ACM 20(4), August 1986

[8] Takagi A., Takaoka H., Oshima T., Ogata Y. Accurate rendering technique based on colorimetric conception, ACM SIGGRAPH Computer Graphics 24(4), August 1990

[9] Perez R., Seals R., Michalsky J. All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy (50)(3), 1993

[10] Shirley P., Morley K. R. Realistic ray tracing, AK Peters Second Edition, 2003

[11] Sillion F. X., Puech C. Radiosity and global illumination, Morgan Kaufmann; 1 edition, 1994

[12] Birn J., Lighting and rendering, New Riders Press. 2000

[13] Poynton Ch. A., Frequently Asked Questions about Color. Toronto, 1997

[14] Poynton Ch. A., A Guided Tour of Color Space, 1997

[15] Pihan R., Denní světlo, Vše o světle, http://www.fotografovani.cz/, květen 2008

[16] Hastings-Trew J., Reproducing Real World Light, http://planetpixelemporium.com/, květen 2008

[17] Cason Ch., Amundsen C., Calimet N. aj., Introduction to POV-Ray, for POV-Ray version 3.6.1, 2004

[18] Cason Ch., Amundsen C., Calimet N. aj., POV-Ray Reference, for POV-Ray version 3.6.1, 2004

[19] Ineichen P., Molineaux B., Perez R., Sky luminance data validation: comparison of seven models with four data banks. *Solar Energy 52*, 337–346, 1994