

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

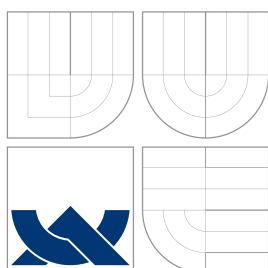
ANIMOVANÝ GRAFICKÝ MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

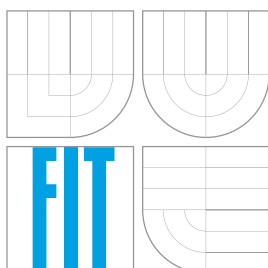
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN MIKŠANÍK

BRNO 2013



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

ANIMOVANÝ GRAFICKÝ MODEL

ANIMOVANÝ GRAFICKÝ MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN MIKŠANÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK,

BRNO 2013

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá demonstrací málo používaných optických jevů v počítačové grafice, konkrétně fluorescencí a dispersí světla. Práce také navrhuje jiný postup při práci se světlem, materiálem a jeho vykreslení. Výsledný návrh je realizován v přiloženém interaktivním demonstračním programu.

Abstract

This bachelor's thesis deals with demonstrations of infrequently used optical phenomena in computer graphics, specifically fluorescence and dispersion of light. The work also proposes a different approach at working with light, material and its rendering. The resulting design is implemented in the attached interactive demonstration program.

Klíčová slova

počítačová grafika, optika, fyzika, fluorescence, rozklad světla, disperze, osvětlovací model, lom světla

Keywords

computer graphics, optics, physics, fluorescence, light dispersion, lighting model, light refraction

Citace

Martin Mikšaník: Animovaný grafický model, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Animovaný grafický model

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka

.....

Martin Mikšaník

15. května 2013

Poděkování

Děkuji Prof. Dr. Ing. Pavel Zemčíkovi za pomoc při pochopení jevů a vedení práce.

© Martin Mikšaník, 2013.

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

1	Úvod	2
2	Světlo	4
2.1	Vlastnosti světla	4
2.2	Osvětlovací model	4
2.3	Radiozita	5
2.4	Raytracing	6
2.5	Phongův osvětlovací model	6
2.6	Lom světla	7
2.7	Fluorescence	9
2.8	Aproximace světla	10
2.9	Reprezentace barvy	11
3	Upravený světelný model	12
3.1	Barevný model	12
3.2	Převod barev	13
3.3	Fluorescenční matice	13
4	Geometrické transformace	14
4.1	Výsledné zobrazení předmětu	14
4.2	Průsečík paprsku s trojúhelníkem v prostoru	14
4.3	Zjištění 2D souřadnice bodu na textuře	16
4.4	Otočení vektoru	17
5	Demonstrační program	18
5.1	Použité technologie	18
5.2	Nastavení a model scény	18
5.3	Mapování textur	19
5.4	Nastavení barevného modelu	19
5.5	Výstup z programu	20
6	Závěr	22
A	Obsah CD	25

Kapitola 1

Úvod

Při tvorbě scény v počítačové grafice se většinou snažíme vytvořit scénu co nejreálněji, aby ji divák v ideálním případě neodlišil od reality (pokud se nejedná např. o komiksové provedení, nejsme limitováni úrovní detailu objektu scény atd.). Takové systémy, které jsou toho do jisté míry schopny sice existují, ale jsou tak výpočetně náročné, že nejsou scénu schopny vykreslovat v reálném čase. Naopak systémy, které scénu generují v reálném čase zase nejsou schopny podchytit všechny efekty, které jsou nutné pro realističnost scény.

Alfa a omega věrohodně vypadající scény je určitě správné osvětlení scény a správné vrhání stínů objektů. Bez správných stínů a osvětlení oko pozorovatele okamžitě pozná, že je scéna umělá a že nevypadá věrohodně (jako např. fotografie). Stíny v této práci pomíame a zaměříme se na osvětlení scény. Klasické scény sice využívají relativně věrohodný model zobrazení ale využívají přitom mechanismy, které realitu příliš zjednodušují, takže se některé fyzikálně/optické jevy zcela potlačí a již nemohou být dodatečně rekonstruovány. Tato práce prezentuje jevy, které jsou pomocí běžných systému obtížné a nerealisticky simulovatelné, protože vycházejí z optických principů světla, které byly v počítačové grafice velice hrubě aproximovány a jsou proto na tyto jevy nepoužitelné. Tato práce představí dva optické jevy a to disperzi světla a fluorescenci.

První z jevů *disperze*, nebo-li rozklad světla, je jev, kdy se světlo při průchodu průhledným materiálem s jinou hustotou prostředí (např. přechod vzduch-sklo) zlomí v úhlech, které jsou závislé na vlnové délce, potažmo barvě, světla. Z původního koherentního záření o jednom svazku paprsku světla se po průchodu světelným hranolem stane N paprsků o různých vlnových délkách, mířících každý jiným směrem. Je téměř nemožné ho pomocí běžných grafických metod nasimulovat, protože se v počítačové grafice požívá světelný svazek skládající se pouze ze tří barev (červená, modrá, zelená), což pro věrohodný rozklad nestačí. Výsledný efekt lze využít jak pro studijní účely chování světla, tak pro věrohodnější zobrazení tenkých průhledných předmětů, kde je disperze světla často viditelná (mýdlové bubliny, tenké skleněné či křišťálové předměty atd.).

Fluorescence je vlastnost materiálu pohltit fotony o určitých vlnových délkách a následně je vyzářit v jiných vlnových délkách, čímž dojde ke změně barvy světla. Typickým příkladem je záření bílých předmětů (papír) pod UV lampou (černé světlo). Tento efekt způsobují fluorescenční bělidla, kterými jsou papíry záměrně běleny, aby byly v kancelářském světle lépe vidět. Tento jev by již šel pomocí tradičních prostředků modelovat lépe, pokud uvážíme scénu se statickým osvětlením, ale při změně osvětlení by byl výsledek pro specifické materiály i tak nevěrohodný a je nutné světelný efekt přepočítat.

Motivací této práce je popsat principy, které jdou případně využít pro realističtější zobrazení scény, ať již v demonstračních případech chování světla nebo pro vykreslení scény,

která bude obohacena o výše zmíněné jevy.

Kapitola 2 se zabývá světlem jako takovým a popisuje základní práce se světlem v počítačové grafice. Zkoumá vliv aproximace jeho reprezentace na optické jevy ve scéně, se zvláštním zaměřením na jev disperze světla a fluorescenci. Kapitola 3 popisuje, jak by šel upravit stávající světelný model, což by umožnilo lepší reprezentaci těchto světelných jevů a tím i věrohodněji vykreslenou scénu. V následující kapitole 5 je popsán způsob, jakým byl napsán demonstrační program pro prezentaci výsledků.

Kapitola 2

Světlo

Tato kapitola obsahuje shrnutí současného stavu. V žádném případě se nejedná o encyklopedii světelně-optických jevů a jejich využití v počítačové grafice. Zabývá se pouze vlastnostmi světla a světelnými jevy, které je důležité pochopit pro jejich aplikaci v rozsahu práce.

2.1 Vlastnosti světla

Aby byl vůbec člověk schopný vnímat barvy, musí být kolem něho v prostoru světlo, které osvětluje předměty, jejichž barvu vnímáme. Světlo je druh elektromagnetického záření o určitém rozsahu vlnových délek a frekvenci. Lidské oči jsou citlivé na elektromagnetické záření o určitém rozsahu vlnových délek. Z tohoto rozsahu jsme schopni vnímat pouze vlnové délky od 380nm do 780nm. Pokud je světlo s nižší vlnovou délkou, hovoříme o ultrafialovém záření (např. RTG, kosmické záření atd). Naopak světlo s vyšší vlnovou délkou než je 780nm nazýváme infračervené (např. tepelné záření, mikrovlnné záření). [8],

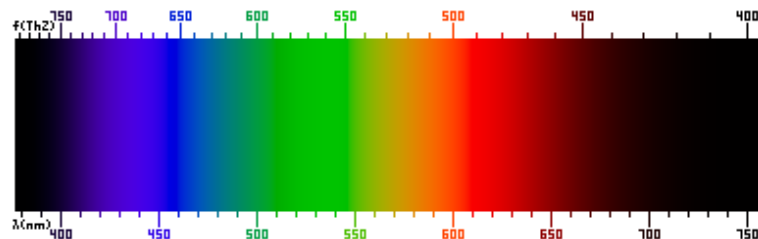
Je-li světlo čistě bílé, hovoříme o tzv. achromatickém světle. Bílé achromatické světlo je soubor rovnoměrně rozložených paprsků přes všechny viditelné vlnové délky. Ve všech světlech ovšem nejsou všechny vlnové délky zastoupeny rovnoměrně. V takovém případě hovoříme o chromatickém světle. Pokud bude světlo chromatické, tzn. nebudou rovnoměrně zastoupeny všechny viditelné vlnové délky, tak výsledné světlo nebude čistě bílé, ale bude zbarvené. [11]

Toho využívá člověk při pozorování a zjišťování barvy předmětu. Pokud na předmět dopadá bílé světlo a jsou všechny paprsky předmětem odraženy, předmět se nám bude jevit jako bílý. Naopak pokud předmět všechny paprsky pohltí, bude se jevit jako černý. Pokud má předmět schopnost pohlcovat jen určitou část paprsků, projeví se tou barvou, která vznikne kombinací všech paprsků odražených od předmětu. [3]

Při průchodu paprsku bílého světla optickým hranolem můžeme vidět na stínítku barevné zastoupení jednotlivých paprsků, tzv. barvy duhy, které přecházejí od paprsků s největší vlnovou délkou (700nm - červená) po paprsky s nejmenší vlnovou délkou (400nm - fialová). Tento jev objevil v roce 1666 sir Isaac Newton. [16] Přehled barev slunečního spektra na obrázku 2.1 [1]

2.2 Osvětlovací model

Pro osvětlení scény je využíváno mnoho metod a principů. Existují metody, které osvětlují scénu pomocí vrhání paprsku (ray tracing [6]), nebo rozdělují scény na plochy a následně



Obrázek 2.1: Frekvence a vlnová délka viditelného světelného spektra

počítají, jak dané plochy na sebe působí (radiozita), ale tyto metody jsou velice početně náročné a jejich provádění v reálném čase je přinejmenším problematické. [5] Asi nejčastěji používaným modelem pro osvětlení scény v reálném čase je Phongův osvětlovací model. Jedním z cílů této práce je zakomponování zmíněných optických jevů paralelně vedle Phongova modelu.

2.3 Radiozita

Je metoda globálního osvětlení scény založená na principu zákona o zachování energie. Lze proto tímto způsobem vykreslovat pouze scény, které jsou energeticky uzavřeny. Celá scéna musí být reprezentována polygonálním modelem, který je následně rozdělen na drobné plošky, které mezi sebou interagují. Tyto plošky nejen odrážejí světlo, ale mohou také světlo vyzařit. Radiozita (zářivost) každé plošky je vyjádřena vztahem, který zachovává princip BRDF:

$$B_i = E_i + R_i \int_j B_j F_{ij}$$



Obrázek 2.2: Ukázka scény s využitím radiozity

Každá ploška má pro všechny ostatní přiřazený konfigurační faktor, jak se navzájem ovlivňují. Plošky, jenž na sebe nevidí mají tento konfigurační faktor roven 0. Princip výpočtů však neumožňuje ve scéně zobrazit průhledné a odrazové materiály, ale ani textury. Jedná se o výpočetně velice náročnou metodu, kterou nelze provádět v reálném čase.

2.4 Raytracing

Je metoda zobrazení počítačové scény, která je založena na vrhání světelných paprsků. Zásadní rozdíl proti realitě je ale v tom, že paprsky se nešíří ze zdroje světla, tak jak to probíhá v reálném světě, ale jsou vrhány z kamery přes promítací plochu do scény, kde se následně odráží a lámou a zjišťuje se výsledná barva na promítací rovině.

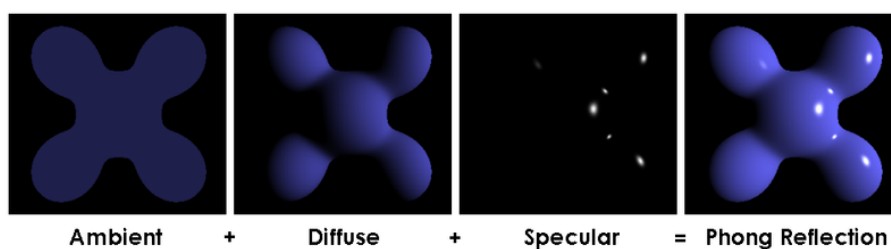


Obrázek 2.3: Velice realistická scéna pomocí metody raytracing

Pomocí této metody lze docílit velice realistických a opticky zajímavých efektů, ale její výpočetní náročnost je také velká.

2.5 Phongův osvětlovací model

Realistického vzhledu při Phongovém osvětlení je dosaženo třemi světelnými složkami (viz obr. 2.4): ambientní (globální světlo), difúzní (odražené světlo) a specular (světlo odlesků). Pro výslednou barvu tělesa sečteme všechny tři složky $C = C_a + C_d + C_s$. Pozice objektů jsou znázorněny na obrázku 2.5. [4], [12], [11]



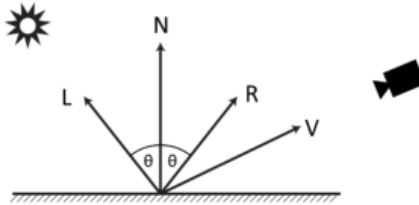
Obrázek 2.4: Phongův osvětlovací model

První složka Phongova osvětlení zajišťuje minimální osvětlení scény. Zaručuje, že i strany tělesa, které jsou odvráceny od zdroje světla nebudou zcela tmavé, ale budou minimálně osvětleny. Tato složka se nazývá ambientní, nebo také globální osvětlení scény. Vypočítá se vztahem $C_a = I_a K_a$. Pokud by jsme ale brali složku čistě z fyzikálního hlediska, tak tato složka popírá zákon zachování energie - objekt bude vyzařovat světlo, i když na něho žádné

světlo nedopadá a tím se porušuje pravidlo BRDF¹.

Druhá složka Phongova osvětlení představuje světlo, které se od matného povrchu tělesa rovnoměrně odráží do všech směrů a tím vytváří trojrozměrný pohled v scéně. Je invariantní vůči směru pohledu. Množství odraženého světla C_d závisí na směru dopadu světla L a normále k povrchu tělesa N . Čím více se směr dopadu světla blíží k normále k povrchu tělesa, tím je množství odraženého světla větší. Tento jev popisuje Lambertův zákon vztahem $C_d = I_d K_d (N \cdot L)$, kde I_d představuje intenzitu difuzního osvětlení scény a K_d je odrazový koeficient materiálu. Pokud je skalární součin vektoru $(N \cdot L) < 0$, znamená to, že je plocha odvrácena od světla, nedopadají na ni paprsky světla, a proto je složka C_d nulová.

Třetí složka udává intenzitu té části světla, která se podle zákona odrazu od tělesa převážně odráží k pozorovateli. Ostatní směry nebereme v úvahu, protože nepočítáme s odrazy paprsků světla na jiná tělesa. Intenzita odrazu je dána vztahem $C_s = I_s K_s (V \cdot R)^n$, kde I_s určuje intenzitu odlesků, K_s určuje odrazivost materiálu, V je směr, odkud povrch pozorujeme a R je světlo odražené od tělesa podle zákona odrazu. R vypočítáme ze vztahu $R = 2(N \cdot L)N - L$. n je tzv. Phongův exponent. Určuje ostrost zrcadlového odrazu - čím bude n větší, tím budou odlesky intenzivnější, ale menší.



Obrázek 2.5: Phongův osvětlovací model

Difuzní složka v našem případě bude hrát hlavní roli při zobrazování disperzního světla.

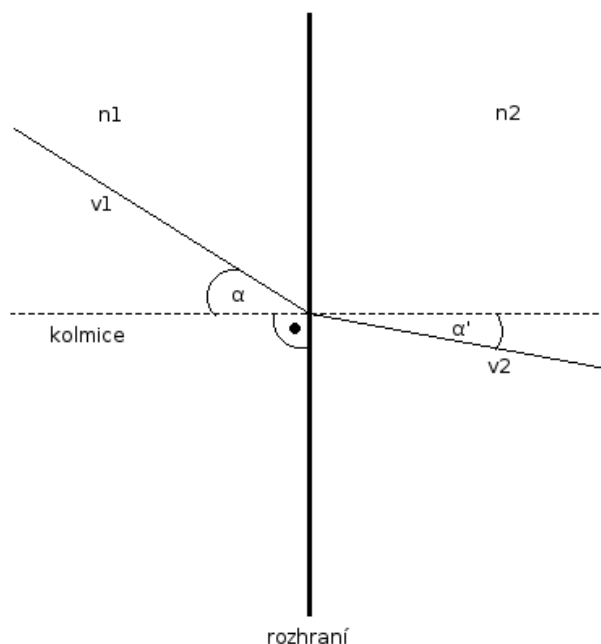
2.6 Lom světla

Prochází-li světlo mezi optickými prostředními (zákon platí pro všechny elektromagnetické záření v látkách, ale tato práce se omezí pouze na světelné záření) s různou hustotou, dochází ke změně vektoru rychlosti světla, vlnové délky a tedy i barvy světelného paprsku. Pro určení velikosti změny byla zavedena bezrozměrná veličina indexu lomu - n . Index lomu lze vyjádřit vzorcem: $n = \frac{c}{v}$, kde c je rychlost světla ve vakuu a v je rychlost světla v prostředí zkoumané látky. Takto definovaný index lomu se označuje jako absolutní index lomu. Pro přechod z prostředí o indexu lomu n_1 do prostředí o indexu lomu n_2 se využívá tzv. relativní index lomu. Ten je definován vztahem $n_{21} = \frac{n_1}{n_2}$. Na rovinném rozhraní dvou látek s různými indexy lomu dochází k lomu světla definovaným Snellovým zákonem:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

kde α je úhel svíraný mezi kolmicí a paprskem světla v prvním prostředí a α' je úhel mezi kolmicí a paprskem světla v druhém prostředí. Viz obrázek 2.6. [18]

¹BRDF (z anglického Bidirectional Reflectance Distributor Function) je označení pro obousměrnou distribuční funkci odrazu světla.



Obrázek 2.6: Disperze světla

Rychlost šíření světla v optických prostředích není pro všechny vlnové délky stejná, ale je závislá na vlnové délce světla, která se také v různých optických prostředích mění. Změnu lze vyjádřit vzorcem:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 f}{\lambda * f} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

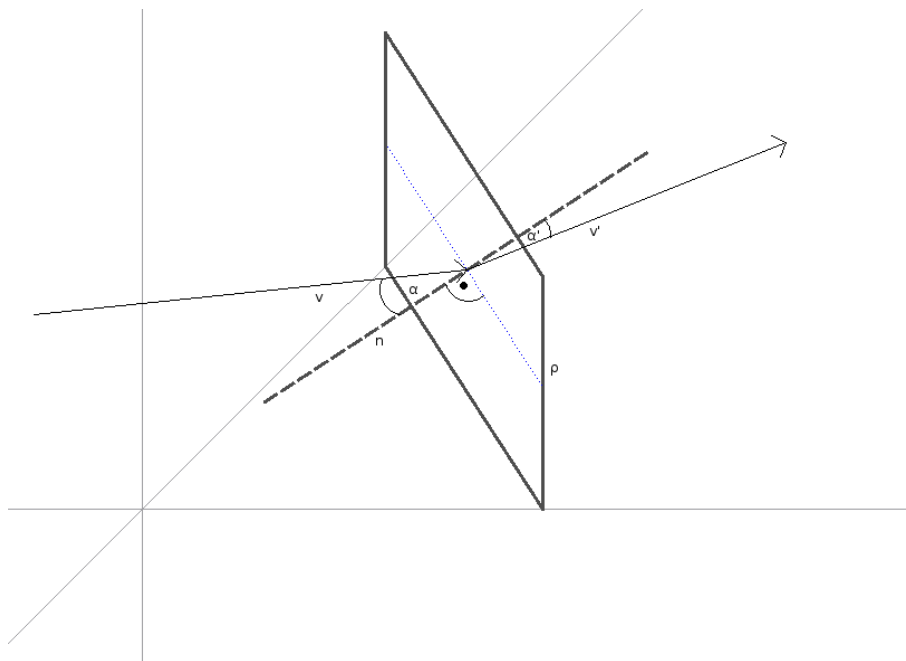
Z toho vyplývá, že látka má pro každou vlnovou délku jiný index lomu.

Disperze světla vzniká průnikem jednotlivých paprsků světla světelným hranolem, který změni směr paprsků v závislosti na indexu lomu materiálu pro danou vlnovou délku světla, viz obrázky 2.8, 2.7.

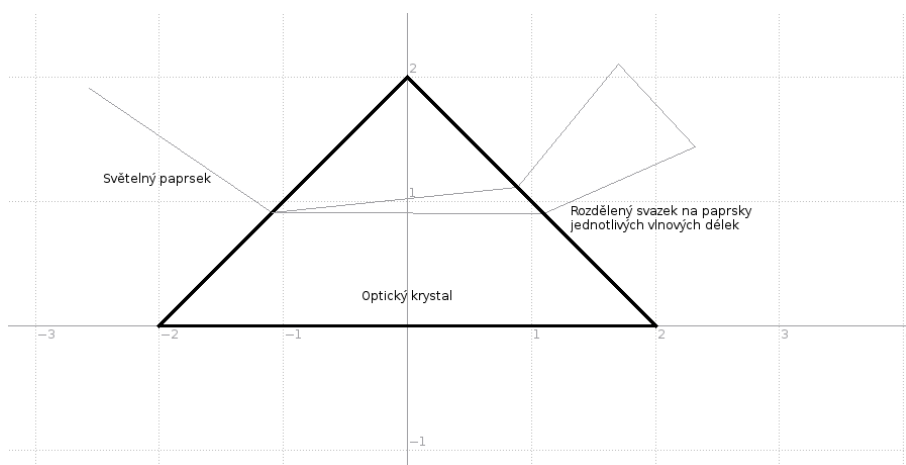
V ideálním případě bylo dobré definovat index lomu materiálu pro každou vlnovou délku. Pokud předpokládáme, že index lomu klesá s vlnovou délkou lineárně, můžeme si situaci zjednodušit tím, že definujeme koeficient změny a daný posun si sami spočítáme. Výhoda tohoto přístupu je ta, že můžeme vytvořit demo příklad, na kterém bude jev disperze světla mnohem patrnější, než ve skutečnosti.

Pokud paprsek světla proniká z opticky hustšího prostředí do řidšího, může se stát, že by jeho úhel odrazu byl větší než $\frac{\pi}{2}$. V takovém případě k lomu světla nedochází, ale nastává totální odraz světla spojený s polarizací světla. Tohoto jevu se v optice často využívá jako náhrada za klasické zrcadlo, které nemá takovou životnost jako skleněný hranol. [3]

Disperze světla probíhá při průchodu světla všemi průhlednými materiály, ale na většině je stěží rozpoznatelná. Je to způsobeno tím, že se sice paprsek při průchodu mezi prostředími s opticky rozdílnou hustotou podle výše uvedených principů zlomí, ale splyne



Obrázek 2.7: Lom světla mezi prostředími s indexem lomu n_1 a n_2



Obrázek 2.8: Znáznornění lomu paprsků s rozdílnou vlnovou délkou

s ostatními paprsky. Proto je tento jev viditelný hlavně na tenkých tvarově nepravidelných tělesech, nebo pokud omezíme světelný zdroj na pouhý bod.

2.7 Fluorescence

Fluorescence je schopnost materiálu pohltit foton, jenž způsobí excitaci valenčních elektronů. Při navrácení elektronu zpět na svůj orbital vznikne nový foton. Obecně je tento jev definován pravděpodobností, že je světlo materiálem pohlceno. [14], [19] Pro jednoduchost je pravděpodobnost aproximována koeficientem intenzity vyzáření vlnové délky.

Pro každý materiál je tedy třeba definovat, jak bude vypadat výsledné záření po dopadnutí světla s určitou vlnovou délkou. V našem případě definujeme matici intenzit vlnových

délek, které se vyzařují při dopadu světla při konkrétní vlnové délce. Výsledný vektor světla vznikne vynásobením vektoru dopadajícího světla a fluorescenční matice materiálu. Pro výpočet konečného RGB světla dopadající na materiál převedeme výsledný vektor na jednotlivé RGB složky, které sečteme. Následně nám tak vznikne z globálního osvětlení scény vlastní světlo pro každý objekt. Zavedením matice ovšem ztratíme informaci o příchozím světle, protože budeme muset rozsah vlnových délek rozdělit do kvantových hladin, čímž ztratíme informaci o původní vlnové délce.

2.8 Aproximace světla

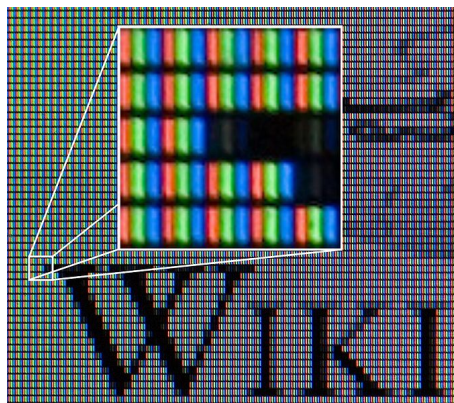
Lidské oko vnímá barvu pomocí 3 druhů čípků. Čípků citlivého na zelenou část (440nm - 645nm), modrou část (380nm - 510nm) a červenou část spektra (380nm - 440nm, 510nm - 780nm). Na základě ozáření těchto 3 senzorů vznikne pro člověka výsledná barva.

Počítačová grafika, využívá toho, že člověk vnímá hlavně tyto tři základní barvy 2.10. Pomocí optického klamu zmate lidské oko, aby vidělo barvu, která jde nakombinovat z těchto složek. Díváme-li se na světelné body ze vzdálenosti mnohonásobně větší, než je vzdálenost bodů od sebe, body splynou v jeden. Následně na základě intenzity jednotlivých bodů mozek určí, jaká je barva 2.9 tohoto složeného bodu. Díky tomu si při zobrazování na monitorech vystačíme pouze se třemi barvami, které nakombinujeme tak, aby byla barva co nejpodobnější té, kterou chceme vyjádřit. [15], [17]



Obrázek 2.9: Výšeč barev, které můžou být reprezentovány pomocí RGB modelu. Barvy mimo trojúhelník nejsou reprezentovány věrohodně

Přesným opakem k míchání světelných paprsků (aditivní míchání barev) je subtraktivní míchání barev. To je založeno na tom, že na začátku má objekt plné světlo a následně se přidáváním barev jednotlivé složky světla odebírají. Využívá se např. v tiskárnách.



Obrázek 2.10: Detail LCD monitoru

2.9 Reprezentace barvy

Nejčastěji se na počítačích reprezentuje barva pomocí RGB modelu, ve kterém je obsaženo na stupnici přirozených čísel od 0 do 255, jak je jednotlivá složka barvy intenzivní. Existují různé modifikace. Například jsou jednotlivé složky reprezentovány reálným číslem od 0.0 do 1.0, nebo jsou reprezentovány s vyšší kvantovou hladinou - nejsou určeny všechny hodnoty do 255, ale jen násobky dvou, čtyř atd., ale ve výsledku počítačový hardware používá původní RGB model.

Další z možných barevných reprezentací je CMYK, která se používá při tisku, HSL, HSV atd., ale ty nejsou v tomto případě zajímavé. [10], [7]

Kapitola 3

Upravený světelný model

Následující kapitola se snaží zhodnotit existující způsoby pro práci se světlem a objasnit, proč existující světelné modely v našem případě nevyhovují.

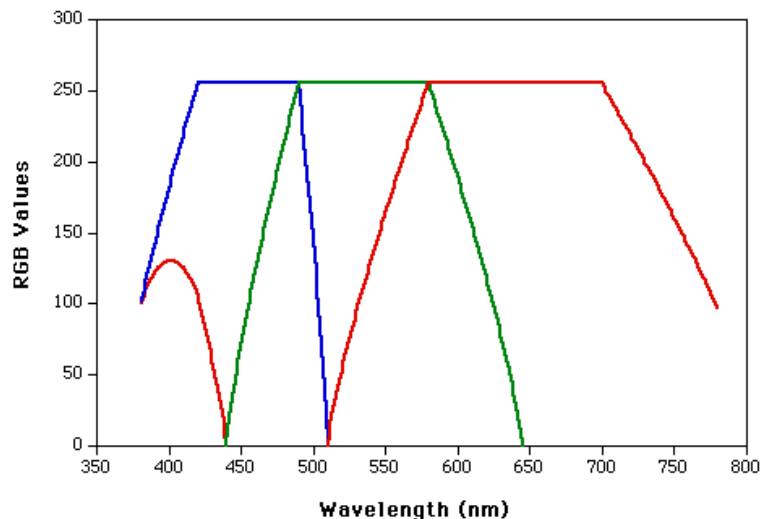
3.1 Barevný model

Běžně využívaný RGB model by v našem případě nešel použít (alespoň co se týká disperze světla), protože neobsahuje údaje o složení jednotlivých složek světla a jejich vlastností. Kombinuje pouze 3 paprsky, což je sice výhodné využít pro výsledné zobrazení (taky to ve většině případů jinak nejde, protože počítačové komponenty zobrazují barvy právě podle RGB modelu), ale např. pro fluorescenci či disperzi světla je právě proto nepoužitelný. V případě disperze světla nejsme schopni paprsek rozložit na více než zmíněné tři barvy, takže výsledný efekt duhy by bylo možno modelovat velice omezeně. Pro fluorescenci je situace již lepší, ale taky vlastnosti materiálu by byly omezeny pouze na tyto 3 barvy. Vzhledem k tomu, že materiál je schopný fluorescence i když na něho dopadá elektromagnetické záření, které není v rozsahu lidského oka. Typický příklad je např. fluorescenční vrstva uvnitř zářivky.

Musel být tedy zvolen takový model, který by splňoval parametry pro vykreslení fluorescence i disperze světla. Pro naše potřeby je použit zjednodušený fyzikální model, kdy je barva reprezentována vlnovou délkou a intenzitou světla. Polaritu, fázi atd. v našem případě taky nepoužíváme. Ta se následně převede na RGB reprezentaci (obrázek 3.1). Z toho důvodu nemůže být světlo složeno pouze z parametru barvy, ale je třeba definovat rozsah vlnových délek obsažených ve světle a jejich intenzitu. Takto složené světlo lze převést na konkrétní barvu, ale může se tak dít až v době, kdy už není důležitá pro výpočet vlnová délka intenzita takto zadaného světla. Např. pro získání fluorescentní barvy tělesa, lze tento výpočet provést ihned po zadání tělesa a světla do scény (výsledný efekt není závislý na poloze těchto objektů), ale pro zjištění směru paprsků z bodového zdroje, které prochází různými optickými prostředími je nutno znát vlnovou délku vždy, když se změní poloha objektu či světla. Aby nedocházelo k problémům kvantových hladin při RGB reprezentaci čísla 0-255, byl použit model, kdy je každá složka reprezentována číslem s plovoucí desetinnou čárkou (GLfloat).

3.2 Převod barev

Převod barev probíhá na základě citlivosti očních čípků na světlo dané vlnové délky. Graf 3.1 reprezentuje, jak jsou oční čípky citlivé na jednotlivé vlnové délky světla. [2]



Obrázek 3.1: Převod vlnové délky na RGB hodnotu

Po výpočtu RGB barvy se ještě upraví faktorem citlivosti oka, protože lidské oko nevnímá všechny barvy stejně intenzivně, ale některé vnímá intenzivněji než jiné. Nejjasněji vnímá zelenou barvu a modrou nejméně jasně. Empiricky byl zjištěn asi takový poměr citlivosti očních čípků: 0.299 pro červenou, 0.587 pro zelenou a 0.114 pro modrou, z čehož vyplývá, že lidské oko vnímá zelenou asi od 500% intenzivněji/jasněji než modrou. [2]

3.3 Fluorescenční matice

Pro reprezentaci materiálu schopných fluorescence se využívá dvojrozměrná matice, která obsahuje intenzity diskretních světelných paprsků v celé šíři spektra, které se vyzáří při dopadu konkrétní vlnové délky. Při definici této matice by se měl zachovávat princip BRDF, což znamená že vyzářené světlo by nemělo mít více energie, než světlo pohlcené, čímž by popřelo zákon o zachování energie (jiné možnosti zajištění luminiscence materiálu, ač jsou možné, zde nebudeme brát v potaz). Výsledný svazek světla odražený k pozorovateli je roven vynásobení této matice vektorem světla světelného zdroje. Tzn. musíme vždy předem znát rozsah vlnových délek, se kterými budeme pracovat, aby jsme byli schopni vytvořit fluorescenční matici.

V případě zavedení spojitého rozsahu všech viditelných délek, bylo nutné používat složitější metody získání vzniklého vyzářeného světla. Bylo by např. možné vybrat z matice nejbližší možnou hodnotu, případně nově vzniklé vyzařované světlo generovat na základě funkce a intervalů na základě vlnové délky a intenzity světla což by bylo extrémně výpočetně náročné, ať již pro samotnou práci s takovým množstvím paprsků, tak pro výpočet nově vyzářeného světla.

Kapitola 4

Geometrické transformace

Tato sekce popisuje jedny z metody, které lze využít pro výpočty pozice a vzájemnou interakci objektů. Pro náš problém se bude hlavně zjišťovat, jak světlo dopadá na vykreslovaný trojúhelník, jakou má s ním polohu a jak ho vyznačit do textury.

4.1 Výsledné zobrazení předmětu

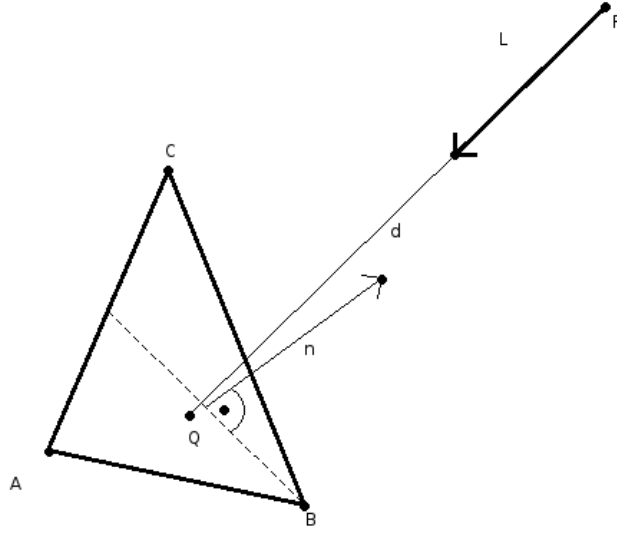
Vzhledem k tomu, že většina zobrazovacích zařízení zobrazuje pouze dvojrozměrný obraz scény, veškeré operace, které provedeme při vykreslování a tvoření scény musí nakonec skončit jejím promítnutím na zobrazovací rovinu. Pro promítnutí do zobrazovací roviny se využívá tzv. projekční matice. Jedná se o matici 4x4, kterou když vynásobíme obrázkový bod získáme dvojrozměrné souřadnice projekce bodu. Tímto způsobem promítneme na plátno všechny body ve scéně. Často se používá matice pro jednoúběžníkovou perspektivu, ale existují i matice pro dvou a tří úběžníkovou perspektivu. [9] [1]

Pokud se střed projekce nalézá v bodě $S[0, 0, 0]$ a průmětna v rovině xy procházející bodem $[0, 0, d]$ pak je transformační matice pro projekci:

$$P_{xy} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} & 0 \end{pmatrix}$$

4.2 Průsečík paprsku s trojúhelníkem v prostoru

Pro správné zobrazení paprsku světla na textuře vykreslovaného trojúhelníku je důležité vědět, kde na rovinu trojúhelníku paprsek dopadá a zda-li se výsledný bod nalézá uvnitř trojúhelníku. Bod průniku paprsku světla s trojúhelníkem jednoduše zjistíme tak, že dosadíme do obecné rovnice roviny proložené trojúhelníkem a parametrické rovnice přímky. Což jde spočítat následovně (Obrázek 4.1:



Obrázek 4.1: Průsečík paprsku světla s rovinou trojúhelníku

$$\rho : 0 = ax + by + cz + D \quad (4.1)$$

$$p : x = P_x + L_x * t \quad (4.2)$$

$$p : y = P_y + L_y * t \quad (4.3)$$

$$p : z = P_z + L_z * t \quad (4.4)$$

$$0 = a(P_x + L_x * t) + b(P_y + L_y * t) + c(P_z + L_z * t) + d \quad (4.5)$$

$$0 = aP_x + bP_y + cP_z + t(aL_x + bL_y + cL_z) + d \quad (4.6)$$

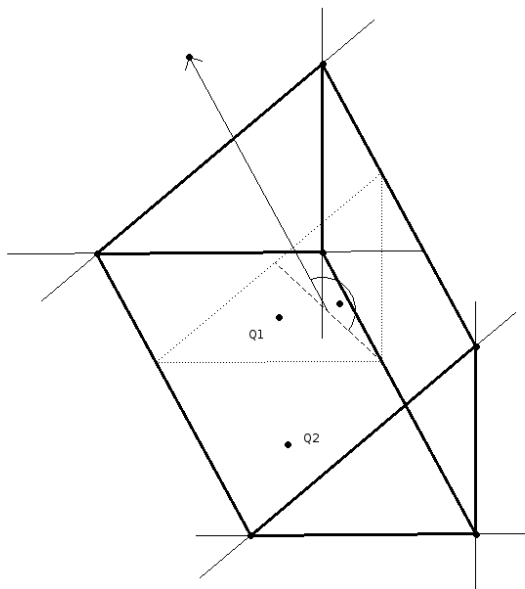
$$t = \frac{aP_x + bP_y + cP_z + D}{(aL_x + bL_y + cL_z)} \quad (4.7)$$

$$Q = P + tL \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Kde A, B, C jsou normálové vektory k rovině trojúhelníku, D je vypočítáno dosazením libovolného vrcholu trojúhelníku do rovnice roviny. P_x je bod zdroje světla, L_x je vektor směru světla, Q je průsečík roviny ρ a přímky p .

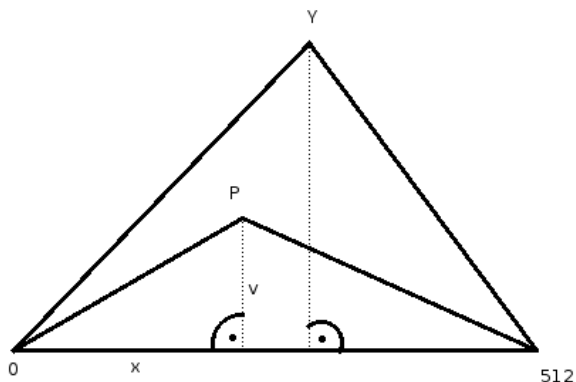
Po zjištění průsečíku přímky s rovinou je třeba ještě zjistit, jestli výsledný průsečík leží uvnitř zadaného trojúhelníku. Opět lze využít rovnice roviny, ale tentokrát normála roviny bude rovna vektorovému součinu vektoru vniklém mezi dvěma vrcholy trojúhelníku a jeho normálou. Pro ověření bodu je třeba provést tuto operaci pro každou stranu trojúhelníku. Tímto vyznačíme kolem trojúhelníku pomyslný plášť kvádru, jak je zobrazeno na obrázku 4.2. Pokud se bod nalézá v takto označeném kvádru, můžeme prohlásit, že bod leží v trojúhelníku a má ho tedy cenu vykreslovat.



Obrázek 4.2: Vyznačení kvádru kolem trojúhelníku

4.3 Zjištění 2D souřadnice bodu na textuře

Pro zjištění správného bodu v textuře, která je udaná pomocí 2D souřadnic, obecného bodu, který je 3D, se využívá Heronův vzorec. Viz obrázek 4.3. [13] Problém nastává, pokud se hledaný bod nenachází v trojúhelníku, ale v zrcadlovém trojúhelníku podle (podle strany a). Tato situace je ovšem nemůže nastat, pokud máme ověřeno, že se bod nalézá opravdu uvnitř trojúhelníku.



Obrázek 4.3: Zjištění souřadnic bodu v textuře

Pro zjištění souřadnice v textuře by jistě šla také použít projekční matice, ale počet operací s ní spojený je větší, než u použitého Heronova vzorce, navíc by vznikl problém se správnou orientací projekční plochy.

4.4 Otočení vektoru

Pro výpočet nového vektoru při lomu světla se využívá otočení vektoru kolem obecné osy n pomocí ortogonální matice a rozdílového úhlu mezi dopadem a odrazem. $n = L \times N$ je vektorový součin kde L je dopadový vektor světla a N je normála k povrchu tělesa. $\beta = \alpha - \alpha'$ $L' = L$ Je vektorový součin L' je odrazový vektor světla, L je dopadový vektor světla a A je ortogonální matice:

$$A = \begin{pmatrix} \cos\beta + n_1^2(1 - \cos\beta) & n_1n_2(1 - \cos\beta) - n_3\sin\beta & n_1n_3(1 - \cos\beta) + n_2\sin\beta \\ n_1n_2(1 - \cos\beta) + n_3\sin\beta & \cos\beta n_2^2(1 - \cos\beta) & n_2n_3(1 - \cos\beta) - n_1\sin\beta \\ n_1n_3(1 - \cos\beta) - n_2\sin\beta & n_2n_3(1 - \cos\beta) + n_1\sin\beta & \cos\beta + n_3^2(1 - \cos\beta) \end{pmatrix}$$

Kapitola 5

Demonstrační program

V demonstračním programu jsem si dal za cíl vytvořit 3D scénu, ve které by šlo názorně demonstrovat zobrazení disperze a fluorescence světla tak, aby šel v ideálním případě vykreslovat pomocí běžně používaných metod (automat OpenGL), ideálně skloubit s běžně používaným Phongovým osvětlovacím modelem.

Disperze světla bude demonstrována dvěma typy materiálu. První bude mít schopnost světlo klasicky vyzářit směrem k pozorovateli. Druhým materiálem bude světlo schopno projít tak, že příchozí paprsek bude zlomen na základě Snellova zákona, případně zcela odražen.

Fluorescence bude vlastnost materiálu určena maticí závislostí výsledného vektoru intenzity paprsků o zadaných vlnových délkách na paprsku o jedné konkrétní vlnové délce. Výsledný vektor intenzity světelných paprsků převede na RGB barvu, čímž získáme výsledné světlo, jenž na materiál dopadá.

5.1 Použité technologie

Demonstrační program je psaný v jazyku C++ pomocí knihoven Qt ¹ Pro výsledné zobrazení, které by mělo probíhat co nejrychleji, je využita knihovna OpenGL ² (obsažena v Qt). Celý světelný model, který je v projektu použit jde ve finále převést pro automat OpenGL, který se postará o jeho vykreslení.

5.2 Nastavení a model scény

Demonstrační scéna byla zvolena co nejjednodušeji, aby početní úkony byly co nejméně početně a časově náročné. Ideálně aby probíhaly v reálném čase. Z tohoto důvodu se scéna skládá pouze z čtvercové místnosti o velikosti 10x10x10, ve které jsou umístěny předměty (kostky, čtyřstěny), které pomocí jejich vlastností získávají specifickou barvu, ať už od klasického světelného zdroje, nebo jednotlivých světelných paprsků.

Pro jednoduchost modelu je každé těleso složené z trojúhelníků, které jsou zadány tak, aby první dva zadané body měly mezi sebou nejdelší stranu. Tuto vlastnost využívá mapování textury, kdy se bod z 3D souřadnic převádí na 2D souřadnice textury. Objekty mají předpočítané souřadnice, takže při vytváření stačí zadat velikost objektu, umístění ve scéně

¹<http://qt-project.org/>

²<http://www.opengl.org/>

a rotaci (kolem středu objektu v konečném umístění). Díky předpočítaným souřadnicím nemusíme výsledné trojúhelníky, ze kterých je objekt složen otáčet, aby vždy nejdelší strana ležela mezi prvními dvěma body.

5.3 Mapování textur

Nejdelší strana je namapována přes celou texturu, což nám zajistí, že třetí bod trojúhelníku bude vždy ležet ve čtverci textury. Výšku textury zjistíme z Heronova vzorce, násobené koeficientem zvětšení/zmenšení hlavní strany.

$$kcoef = a/512 \quad (5.1)$$

$$x^2 + v^2 = c^2 \quad (5.2)$$

$$(a - x)^2 + v^2 = b^2 \quad (5.3)$$

$$a^2 - 2ax = b^2 - c^2 \quad (5.4)$$

$$x = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2a} \quad (5.5)$$

$$v^2 = c^2 - x^2 \quad (5.6)$$

$$v = \sqrt{c^2 - x^2} \quad (5.7)$$

$$X = x * kcoef \quad (5.8)$$

$$Y = v * kcoef \quad (5.9)$$

$$(5.10)$$

Pro vykreslování textury nebyly použity funkce, které jsou již obsažené v OpenGL automatu. Celá textura je vygenerovaná manuálně mimo OpenGL automat. Je to z toho důvodu, že se textury nemusejí přepočítávat během pohybu ve scéně, ale při manipulaci s ní. Pro výslednou texturu se nejprve vypočítá ambientní a difúzní barva textury všech normálních světél obsažených v modelu (počítá se již s upraveným světlem tak, aby vyhovovalo fluorescenčním vlastnostem materiálu, viz. 2.7 Pro zjednodušení výpočtů se používá ne příliš obrazově věrohodný flat shading, což je způsob vykreslení, který zanechává značně viditelné hrany objektu. Následně se do textury přičtou všechny bodové zdroje, pokud dopadají na texturu. Pokud na texturu dopadají bodové zdroje, je pro vylepšení obrazu použit mediánový konvoluční filtr, který zhladí přechod, mezi dopadajícím světlem a původní texturou.

5.4 Nastavení barevného modelu

Zdroje světla ve scéně se definují zastoupením jednotlivých složek spektra a jejich intenzitou. Také všechny materiály obsahují definici, jakým způsobem reagují na dopad jednotlivých paprsků o dané vlnové délce a jak mění jejich intenzitu. Pro klasické materiály by se jednalo o matici, která má nenulové hodnoty pouze na hlavní diagonále. Jelikož jde o velice objemný a relativně nepřehledný soubor informací, je nastavení provedeno pomocí vygenerovaných parametrů.

Generátor spektra

Pro generování intenzity osvětlení je použit generátor založený na Gaussově funkci. Díky pozvolnému nárůstu a klesání funkce je velice jednoduché zvýraznit vybraný okruh vlnových

délek.

Gaussova funkce se využívá také pro generování fluorescenční matice. Algoritmus procházející matici rovnoměrně, přemístí intenzitu světla o zadané vlnové délce (rozsahu), která vstupuje do procesu fluorescence, a přesouvá ji k druhé vlnové délce, která má být vyzařována.

Aplikace Disperze světla

Při každé změně scény je vždy třeba přepočítat všechny paprsky vycházející z bodového zdroje, protože mohlo dojít ke změně zobrazení. Pro vybrání správného trojúhelníku, se kterým se paprsek protne, je důležité najít ten, jenž leží nejbližší k zdroji světla, ale zároveň na něho paprsek dopadá. Po nalezení správného trojúhelníku se zjistí bod dopadu v trojúhelníku a nastaví se koncový bod světelnému paprsku.

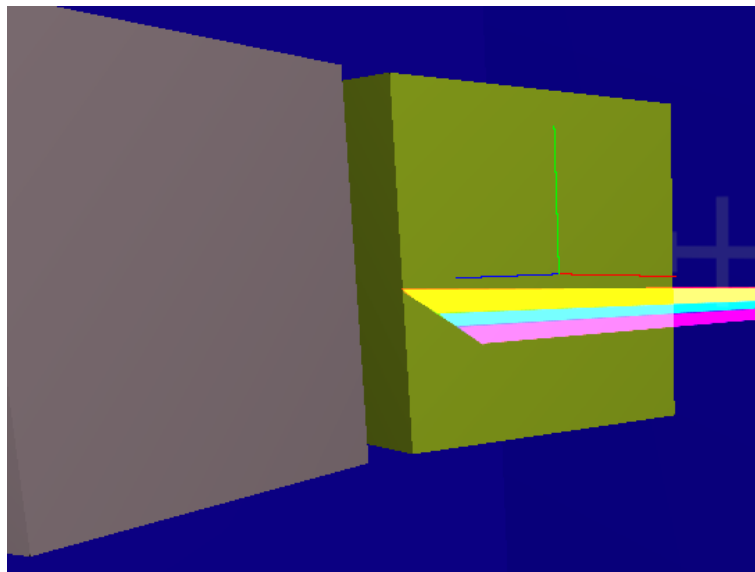
Pokud se jedná o klasický materiál, dojde k zapsání paprsků, jako by se jednalo o difuzní světlo. Pokud se ale jedná o průhledný materiál, který má schopnost lámat světlo, vytvoří se nový paprsek, který má směr daný Snellovým zákonem. Pokud je úhel mezi dopadajícím světlem a normálou roviny menší než $\frac{\pi}{2}$, dochází k průniku paprsku do předmětu. Pokud je úhel větší než $\frac{\pi}{2}$, je třeba změnit směr normály roviny a změnit relativní index lomu $n_{21} = \frac{1}{n_{12}}$.

Aby šlo světlo lépe vidět, je do cílové textury vygenerován čtverec, nikoli pouze jeden texturový bod. Pro každý paprsek zvlášť se hledá nejbližší těleso, na které paprsek dopadne.

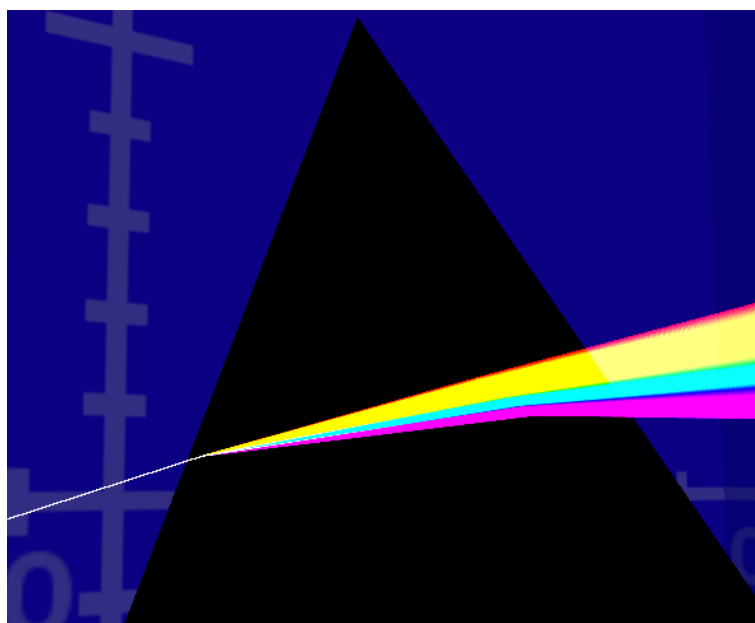
5.5 Výstup z programu

Pohyb ve vykreslené scéně je zajištěn zcela pomocí kurzoru. Natáčení kamery se docílí pohybem kurzoru za držení levého tlačítka. Pro posun ve scéně bylo zvoleno kolečko. Program obsahuje na pravé straně panel, kterým lze měnit podmínky ve scéně. Je zde prostor pro zadání optické hustoty krystalu a jeho otočení. Dále je zde koeficient, pomocí kterého se nastaví index lomu pro danou vlnovou délku (čím je větší, tím paprsky drží více při sobě a naopak).

Na obrázku 5.1 je vidět zobrazení dvou materiálů, které mají stejnou barvu, ale rozdílnou fluorescenční schopnost. Materiál nalevo se snaží vyrovnat v chromatickém světle barvu do bíla, kdežto druhý materiál nemá žádnou fluorescenci nastavenou. Na obrázku 5.2 lze vidět průchod paprsků optickým hranolem a tím vzniklou disperzi světla. V tomto případě prochází světlo optický hustším prostředím hranolu.



Obrázek 5.1: Demonstrační obrázek fluorescence



Obrázek 5.2: Demonstrační obrázek disperze

Kapitola 6

Závěr

Cílem práce bylo vytvořit a implementovat postup, pomocí kterého by bylo možné renderovat scény za přítomnosti optického jevu disperze světla a fluorescence.

Výsledkem práce je demonstrační program, který kombinuje způsob vykreslování scény pomocí Phongova osvětlovacího modelu, rozšířeného o schopnost správně vykreslovat fluorescenční materiály na základě vlnových vlastností světla a materiálu, a metody, která umožňuje zobrazení změny směrového vektoru světelného paprsku po průchodu optickým hranolem, což umožňuje ve scéně zobrazit disperzní světlo, čímž byl záměr práce splněn.

Základním stavebním prvkem práce je reprezentace světla pomocí vektoru paprsků s různou intenzitou a vlnovými délkami. Díky tomuto prvku bylo možné dále pokračovat v implementaci disperze světla a fluorescence.

Disperze světla je v programu demonstrována bodovým zdrojem, který září na otáčející se optický hranol, který mění směrový vektor světla na principu Snellova zákona, čímž vzniká rozklad světla na duhové spektrum.

Fluorescence světla je demonstrována nastavením materiálu výsledného prvku tak, aby byl schopný správně odrážet fluorescenční záření při jakémkoliv osvětlení.

Práce mne přiměla nastudovat různé chování elektromagnetického záření, které je velice zajímavé i mimo počítačovou grafiku. Zvláště bylo zajímavé sledovat, jak se při disperzi světla odráží paprsky v materiálu s vysokým indexem lomu, pokud do ní proniknou pod správným úhlem. Také práce na zobrazení scény mi zlepšila představivost a orientaci v 3D prostoru.

V práci bych chtěl pokračovat hlavně vytvoření palety funkcí a postupů, jak zjednodušit operace při renderování scény, aby byla rychlost generování složitějších scén možná v reálném čase. Také by bylo výhodné přidat již běžně používané metody pro práci se světlem, např. dynamické stíny. Dále by šlo pokračovat v rozšíření palety optických jevů, které se v běžně v počítačové grafice nevyužívají, zejména polarizací světla.

Literatura

- [1] Barák, B.: Promítací algoritmy v počítačové grafice. 2007.
- [2] Bruton, D.: Approximate RGB values for Visible Wavelengths.
<http://www.physics.sfasu.edu/astro/color/spectra.html>, 1996-02-20 [cit. 2013-5-10].
- [3] Čáp, J.: Aplikovaná optika.
- [4] Cook, R. L.; Torrance, K. E.: A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ročník 1, č. 1, 1982: s. 7–24.
- [5] Debevec, P.: Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In *ACM SIGGRAPH 2008 classes*, ACM, 2008, str. 32.
- [6] Glassner, A. S.: *An introduction to ray tracing*. Morgan Kaufmann Pub, 1989.
- [7] Horák, K.; Kalová, I.; Petyovský, P.; aj.: Počítačové vidění. *FEKT VUT Brno*, 2007.
- [8] HRUŠKA, P.: Fyzikální optika.
- [9] Jelínek, Z.: Algoritmy pro výpočet globálního osvětlení.
- [10] Joblove, G. H.; Greenberg, D.: Color spaces for computer graphics. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, ročník 12, ACM, 1978, s. 20–25.
- [11] KRŠEK, P.: Základy počítačové grafiky.
- [12] Kuijk, A. A. M.; Blake, E. H.: Faster phong shading via angular interpolation. In *Computer Graphics Forum*, ročník 8, Wiley Online Library, 1989, s. 315–324.
- [13] Kuřina, F.: Heronův důkaz Heronova vzorce. *Učitel matematiky*, ročník 4, 1998: str. 28.
- [14] Lakowicz, J. R.: *Principles of fluorescence spectroscopy*. Springer, 2009.
- [15] Sharma, G.: LCDs versus CRTs-color-calibration and gamut considerations. *Proceedings of the IEEE*, ročník 90, č. 4, 2002: s. 605–622.
- [16] Štoll, I.: Jan Marek Marci v dějinách fyziky. *Historie matematiky. II*, 1997: s. 69–108.
- [17] Süsstrunk, S.; Buckley, R.; Swen, S.: Standard RGB color spaces. In *Proc. IS T/SID 7th Color Imaging Conf*, 1999, s. 127–134.

- [18] TOLAR, J.: Vlnění, optika a atomová fyzika.
- [19] Wilkie, A.; Tobler, R. F.; Purgathofer, W.: Combined rendering of polarization and fluorescence effects. In *Proceedings of the 12th Eurographics conference on Rendering*, Eurographics Association, 2001, s. 197–204.

Příloha A

Obsah CD

Disk přiložený k této práci obsahuje následující složky:

/app/ Přeložená aplikace pro x86_64 GNU/Linux

/doc/ Vygenerovaná technická zpráva ve formátu PDF

/app-source/ Zdrojové soubory aplikace

/doc-source/ Zdrojové soubory technické zprávy