

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

PROMÍTÁNÍ KAMEROU TYPU „RYBÍ OKO“

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

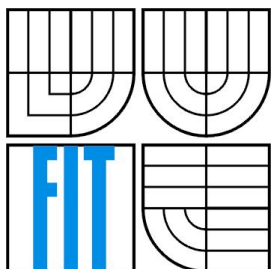
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Pavel Macík

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

PROMÍTÁNÍ KAMEROU TYPU „RYBÍ OKO“

„FISH-EYE“ CAMERA PROJECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Pavel Macík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal Seeman

BRNO 2008

Abstrakt

Práce popisuje teoretické základy optiky a problematiku vykreslování metodou sledování paprsku, jehož součástí je popsán problém výpočtu průsečíku paprsku s trojúhelníkem, výpočet osvětlení a optimalizační techniky pro urychlení výpočtu. V další části jsou charakterizovány návrhy tří různých matematických modelů kamery pro vykreslování trojrozměrné scény metodou sledování paprsku – plošná kamera, dírková kamera a sférická kamera (rybí oko). V práci jsou dále srovnány vlastnosti jednotlivých modelů kamery a jejich vliv na promítaný obraz scény. V rámci práce byl implementován program vykreslující scénu metodou sledování paprsku, jehož součástí je implementace popsaných modelů kamery.

Klíčová slova

optika, sledování paprsku, průsečík paprsku s trojúhelníkem, průsečík paprsku s kulovou plochou, adaptivní podvzorkování, obalová koule, model kamery, plošná kamera, dírková kamera, sférická kamera, rybí oko

Abstract

The thesis describes theoretical fundamentals of optics and problems of ray-tracing method, ray-triangle intersection computation included. Next section describes concept of three different camera models for ray-tracing method – plain camera, pinhole camera and spherical camera (fish-eye). The thesis compares properties and capabilities of camera models and their effect to projected image of a scene. The program for raytracing was implemented for purposes of the thesis including implementation of camera models described in the thesis.

Keywords

optics, ray-tracing, ray-triangle intersection, ray-sphere intersection, adaptive subsampling, bounding sphere, camera model, plain camera, pinhole camera, spherical camera, fish-eye

Citace

Macík Pavel: Promítání kamerou typu „rybí oko“, Brno, 2008, diplomová práce, FIT VUT v Brně.

Promítání kamerou typu „rybí oko“

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Seemana.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Pavel Macík
6. 5. 2008

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Seemanovi za veškerou pomoc, kterou mi poskytl během zpracování této práce.

© Pavel Macík, 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 Optika.....	5
2.1 Přímočaré šíření světla.....	6
2.2 Útlum světla.....	7
2.3 Odraz světla.....	7
2.4 Lom světla.....	7
3 Sledování paprsku (ray-tracing).....	9
3.1 Průsečík paprsku s trojúhelníkem.....	10
3.2 Průsečík paprsku s kulovou plochou.....	12
3.3 Phongův osvětlovací model.....	13
3.4 Optimalizace – urychlení výpočtu.....	14
3.4.1 Adaptivní podvzorkování.....	15
3.4.2 Obalová tělesa.....	15
4 Matematický model kamery.....	18
4.1 Teoretický popis kamer.....	19
4.1.1 Plošná kamera.....	19
4.1.2 Dírková kamera.....	19
4.1.3 Sférická kamera – rybí oko.....	20
4.2 Řešení.....	21
4.2.1 Plošná kamera.....	21
4.2.2 Dírková kamera.....	21
4.2.3 Sférická kamera.....	21
5 Srovnání kamer.....	24
5.1 Charakteristiky kamer.....	24
5.2 Plošná kamera.....	25
5.3 Dírková kamera.....	26
5.4 Sférická kamera.....	28
6 Použití kamer.....	30
6.1 Plošná kamera.....	30

6.2 Dírková kamera.....	30
6.3 Sférická kamera.....	30
7 Implementace - SewerRT.....	32
7.1 Popis programu.....	32
8 Závěr.....	34
Literatura.....	35
Seznam obrázků.....	36
Seznam příloh.....	37

1 Úvod

Pojmem *rybí oko* se označují speciální objektivy pro fotografii, jejichž úhel záběru je 180° ve všech směrech. Tyto objektivy typicky zkreslují snímanou scénu kulovým zkreslením perspektivy. Pro postihnutí celého záběru objektiv nevykresluje celou plochu filmového políčka, ale pouze kroužek, který je mu vepsaný (viz obrázek 1.1). Používá se pro pořizování fotografií architektury, krajiny, noční i denní oblohy, vnitřních prostor budov apod. Využívá se uměleckého dojmu, který poskytuje kulové zkreslení perspektivy.



Obrázek 1.1: Fotografie pořízená pomocí objektivu rybí oko. Převzato z [LEE]

V této práci jsou popsány základní pojmy a teorie, která se týká počítačové grafiky a vykreslování pomocí kamery s objektivem typu rybí oko. V kapitole 2 jsou přehledově uvedeny základy optiky. Nejprve je popsáno přímočaré šíření světla, poté následuje vysvětlení útlumu světla. Dále jsou stručně charakterizovány jevy optiky: lom a odraz světla.

V další kapitole je popsán princip metody vykreslování trojrozměrné scény zvané sledování paprsku, v jejímž rámci je uveden postup výpočtu průsečíku paprsku s trojúhelníkem a Phongův osvětlovací model pro výpočet osvětlení.

Ve 4. kapitole je rozebrán obecný matematický model kamery pro zobrazování trojrozměrné scény. Jsou v ní popsány tři druhy kamery: plošná kamera, která zobrazuje scénu rovnoběžným promítáním, dírková kamera, která promítá středovým promítáním, a sférická kamera, která umožňuje promítání scény způsobem jako kamera typu rybí oko.

Kapitola 5 se zabývá srovnáním jednotlivých typů kamery, jejich vlastností a vlivu změny jejich parametrů na promítaný obraz scény. V kapitole, která následuje jsou stručně popsány situace a aplikace, pro které jsou příslušné modely kamery vhodné.

V poslední kapitole je popsán program, který je implementován v rámci a pro účely této práce. Program se používá pro vykreslování definované trojrozměrné scény a využívá algoritmů a metod

popsaných v této práci, včetně všech tří modelů kamery, kterými se tato práce zabývá. Program je zároveň použit pro srovnání vlastností jednotlivých modelů kamery, které je popsáno v kapitole 5.

Tato diplomová práce navazuje a rozšiřuje Semestrální projekt [SEP].

2 Optika

Optika je fyzikální obor, který se zabývá zkoumáním světla. Světlo je jen částí spektra elektromagnetického záření, kterou jsme schopni vnímat naším zrakem. Optika zkoumá povahu a šíření světla, jeho interakci s různými prostředími, chování světla na rozhraní dvou prostředí a další jevy, které se světlem souvisí.

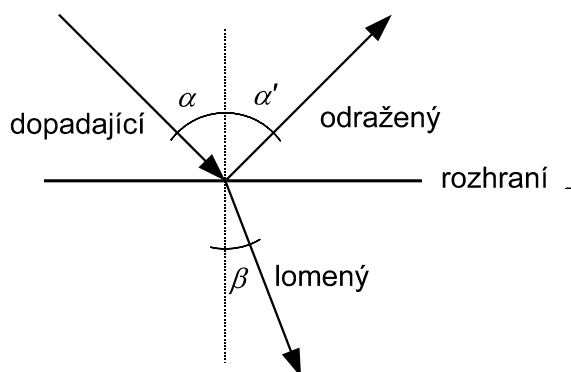
Optika se dělí do následujících podoblastí [ŽÁRA]:

- *Geometrická optika* – modeluje světlo jako nezávislé paprsky, jejichž dráhu lze popsat geometrickými pravidly.
- *Vlnová optika* – modeluje světlo jako elektromagnetické vlny.
- *Elektromagnetická optika* – podobně jako vlnová optika, popisuje navíc polarizaci a disperzi světla.
- *Fotonová (kvantová) optika* – popisuje interakci světla s materiály.

Vzhledem k tomu, že se optikou zabýváme v rámci počítačové grafiky, ve které se používá zejména geometrická optika, budou nás zajímat jen některé její aspekty a jevy. Pro nás budou zajímavé následující jevy:

- přímočaré šíření světla
- útlum světla
- odraz světla
- lom světla

Počítačová grafika je z pohledu optiky simulační úlohou, při které se simuluje šíření světla trojrozměrnou scénou, případně k pozorovateli, a interakce světla se scénou. Pro účely této práce se zaměříme na geometrickou optiku, ve které se šíření světla prostředím (scénou) popisuje pomocí nezávislých paprsků. Šíření světla je popsáno v kapitole 2.1.



Obrázek 2.1: Tři různé druhy paprsků na rozhraní dvou prostředí

Pokud paprsek světla narazí na rozhraní dvou prostředí, kterým může být nějaká překážka, může dojít k ovlivnění vlastností paprsku. V případě, že tímto rozhraním je nějaký reflexivní povrch, dojde

ke změně směru a orientace paprsku, která má za následek odražení paprsku světla. Jedná se o *odraz světla* a zabývá se jím kapitola 2.3. Další možností, jak se může paprsek světla chovat na rozhraní dvou prostředí, je situace, kdy paprsek pronikne skrz toto rozhraní do druhého prostředí. Pokud v tomto případě směr paprsku není kolmý k rovině rozhraní, může dojít k vychýlení směru paprsku, kterému se říká *lom světla*; tomu se věnuje kapitola 2.4. Nejčastěji dochází ke kombinaci těchto jevů, kdy se část světla od rozhraní prostředí odrazí a část světla projde skrz rozhraní.

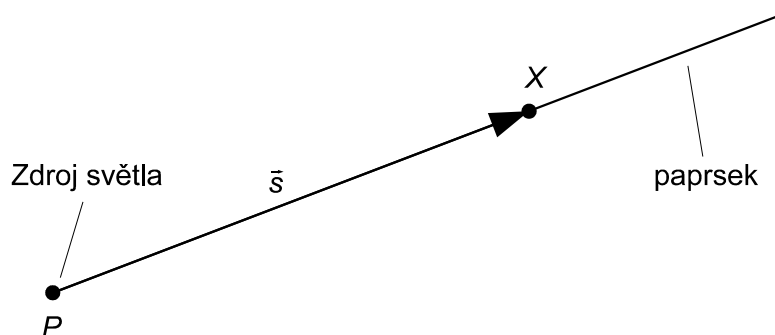
Na rozhraní dvou prostředí se tedy vyskytují tři různé druhy paprsků [HALL] (viz obrázek 2.1):

- dopadající paprsek
- odražený paprsek
- lomený paprsek

Každý z paprsků má svůj směr pod určitým úhlem vzhledem k normále povrchu (kolmice k rovině povrchu v místě dopadu dopadajícího paprsku). Tyto úhly jsou *úhel dopadu* α , *úhel odrazu* α' a *úhel lomu* β . Rovinu, ve které leží dopadající paprsek a normála k povrchu, se nazývá *rovina dopadu*.

2.1 Přímočaré šíření světla

Světlo vzniká ve světelném zdroji¹ a od něj se šíří všemi směry přímočaře. Světlo se prostorem šíří prostřednictvím svých částic – *fotonů*. Tyto fotony spolu nesou informaci o zdroji, ze kterého pocházejí. Tato informace, vlnová délka, je pro nás důležitá, protože reprezentuje barvu světla, jakou má daný foton. Jednotlivé fotony se od zdroje světla pohybují po optické dráze, kterou je v našem případě polopřímka, dokud nenarazí na překážku, od které se buď odrazí (viz kapitola 2.3), nebo projde skrz ni (viz kapitola 2.4), nebo nevstoupí do opticky aktivního prostředí². Optickou dráhu fotonu lze popsat orientovanou polopřímkou, která se nazývá *paprsek*.



Obrázek 2.2: Paprsek světla

¹ Předpokládáme, že máme bodový zdroj světla.

² Prostředí, ve kterém dochází k interakci s fotonem světla a ovlivňování jeho vlastností (rozptyl, útlum, atp.)

Paprsek je možné charakterizovat několika způsoby (viz obrázek 2.2):

- bod a vektor (výchozí bod P ; směrový vektor \vec{s})
- dva body (výchozí bod P ; bod, kterým paprsek prochází X - koncový bod)

Pokud paprskem popisujeme optickou dráhu fotonu, je výchozím bodem zdroj světla P . Směrovým vektorem \vec{s} je pak dán směr, kterým se foton pohybuje. Tento vektor lze jednoduše získat i v případě, kdy máme paprsek charakterizován pomocí dvou bodů P a X podle vztahu (1).

$$(1) \quad \vec{s} = (X - P)$$

2.2 Útlum světla

Z vlnové podstaty světla [HALL] vyplývá, že se světlo se vzrůstající vzdáleností od zdroje rozptyluje s čímž souvisí pokles jeho intenzity. Vztah (2) vychází z obecného *Zákona převráceného čtverce* (*Inverse square law*), který říká [NAVE], že intenzita elektromagnetického záření (v našem případě světla) klesá s druhou mocninou vzdálenosti:

$$(2) \quad I = \frac{I_s}{4\pi r^2} = \frac{k}{r^2}$$

Konstanta k popisuje intenzitu světla, kterou vyzařuje bodový zdroj světla. Tento pokles intenzity v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla se nazývá *útlum světla*.

2.3 Odraz světla

Jak již bylo uvedeno, na rozhraní dvou prostředí může dojít k odrazu dopadajícího paprsku. Chování dopadajícího paprsku při odrazu se řídí *zákonem odrazu* (vztah (3)), který říká, že úhel odrazu je roven úhlu dopadu.

$$(3) \quad \alpha' = \alpha$$

Význam úhlů α a α' znázorňuje obrázek 2.1. Navíc platí [HALL], že odražený paprsek zůstává v rovině dopadu. Vzhledem k tomu, že se pohybujeme v rámci geometrické optiky, nedochází při odrazu k žádné jiné změně vlastností dopadajícího paprsku, než ke změně jeho směru a orientace.

2.4 Lom světla

Pokud vlastnosti povrchu rozhraní umožní dopadajícímu paprsku projít skrz rozhraní dvou prostředí, nedojde-li tedy k jeho úplnému odrazu, dopadající paprsek projde rozhraním, při kterém může dojít ke změně jeho směru. Tato změna směru dopadajícího paprsku je dána *zákonem lomu*,

který se nazývá *Snellův zákon* (vztah (4)). Lomený paprsek stejně jako v případě odrazu zůstává [HALL] v rovině dopadu.

$$(4) \quad n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$$

$$(5) \quad \beta = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\alpha)\right)$$

α ve vztahu (4) představuje úhel dopadu (viz obrázek 2.1), zatímco β reprezentuje úhel, pod kterým se paprsek lomí - *úhel lomu*. n_1 a n_2 jsou bezrozměrné veličiny nazývající se *index lomu*. Indexu lomu charakterizuje dané prostředí. Jeho hodnota udává, jakou rychlostí se v daném prostředí pohybuje světlo vzhledem k rychlosti světla ve vakuu.

Úhel, pod kterým se paprsek na rozhraní lomí, je tedy dán vztahem (5) a závisí na úhlu dopadu dopadajícího paprsku a poměru indexů lomů obou prostředí, na jejichž rozhraní k lomu dochází.

V reálném případě, ve kterém dochází na rozhraní dvou prostředí k odrazu i lomu zároveň, může nastat situace, kdy by při výpočtu úhlu lomu měla vyjít hodnota tohoto úhlu větší nebo rovna 90° ($\frac{\pi}{2}$, chcete-li). Tehdy dochází k takzvanému úplnému odrazu (totální reflexi), kdy je dopadající paprsek pouze odražen. Nikdy [HALL] nemůže nastat situace, při níž by se lomený paprsek dostal na stejnou stranu rozhraní, na které je paprsek dopadající.

V rámci geometrické optiky dochází při lomu pouze ke změně směru dopadajícího paprsku.

3 Sledování paprsku (ray-tracing)

Sledování paprsku je technika realistického vykreslování trojrozměrné scény. Vychází z představy o přímočarém šíření světla od světelného zdroje. Dopadne-li světlo na nějaké těleso, může být odraženo, pohlceno nebo může daným tělesem projít. Nakonec může takové světlo opustit scénu, nebo může dopadnout na sítnici oka (resp. obrazovku, kde se zobrazí pixel s barvou dopadnutého světla), kde dojde k jeho zpracování – vidění.

Technika sledování paprsku představuje opačný přístup; jedná se o zpětné sledování paprsku od pozorovatele ke zdroji světla. Pro každý pixel obrazovky je vyslán do scény paprsek světla a sleduje se jeho průchod scénou. V závislosti na tom, jestli danému paprsku zkrátí cestu nějaké těleso nebo jestli paprsek opustí scénu, je daný pixel vykreslen s barvou nejbližšího tělesa, přičemž je zohledněn vliv zdrojů světla ve scéně, nebo barvou pozadí. Barva každého pixelu se vypočítá zejména na základě osvětlovacího modelu (např. Phongova (viz kapitola 3.3)) v místě, kde vyslaný paprsek protíná nějaké těleso.

Takovýto paprsek, který vychází od pozorovatele, se nazývá *primární paprsek*. Existují ještě tzv. *sekundární paprsky*, které jsou vysílány a sledovány z místa dopadu primárního paprsku v závislosti na vlastnostech daného tělesa. Sekundární paprsky jsou tedy paprsky odražené od povrchu tělesa nebo paprsky, které pronikly pod povrch daného tělesa. Výsledná barva pixelu primárního paprsku, která je dána osvětlovacím modelem určeném v místě, kde paprsek protíná nějaké těleso, je pak dána součtem barvy primárního paprsku a barev sekundárních paprsků.

Jak je vidět, jedná se o rekurentní problém. Sledováním jednoho (primárního) paprsku sledujeme navíc dva paprsky sekundární (odražený a lomený). Algoritmus obecného sledování paprsku je uveden v následujícím výpisu [ŽÁRA]:

sledujPaprsek(paprsek R , hloubka_rekurze H):

1. Najdi průsečík X paprsku R s nejbližším tělesem.
2. Pokud průsečík neexistuje, vrať barvu pozadí a skonči.
3. Ke každému zdroji světla Z_i vyšli z bodu X stínový paprsek S a pokud S dorazí k Z_i , označ Z_i jako nezakrytý.
4. Vypočítej osvětlení v bodě X pro všechny nezakryté zdroje světla na základě osvětlovacího modelu.
5. Pokud hloubka rekurze H nepřekročila maximální hloubku, vyšli
 - a) odražený paprsek R_O voláním sledujPaprsek(R_O , $H + 1$)
 - b) lomený paprsek R_L voláním sledujPaprsek(R_L , $H + 1$)
6. Paprsku R přiřaď barvu, která je dána součtem osvětlení a barvy odraženého a lomeného paprsku.

3.1 Průsečík paprsku s trojúhelníkem

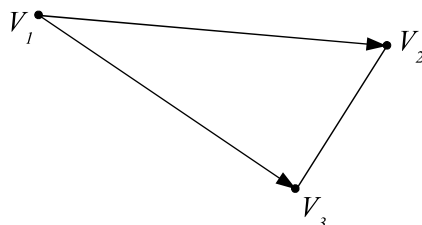
Jak již bylo uvedeno, barva každého pixelu je vypočtena na základě součtu osvětlení v místě, kde primární paprsek protíná nějaké těleso ve scéně, a výsledku sledování sekundárních paprsků (odraženého a lomeného). K tomu je třeba výpočtem určit místo průsečíku paprsku s tělesem. Vzhledem k tomu, že se pro reprezentaci povrchu těles nejčastěji používají trojúhelníky, popíšeme si výpočet průsečíku paprsku právě s trojúhelníkem. Pro výpočet tohoto průsečíku použijeme Badouelova algoritmu [BADO].

K tomu, abychom mohli vypočítat průsečík paprsku R s trojúhelníkem, jehož vrcholy jsou V_1 , V_2 a V_3 , budeme postupovat ve dvou fázích.

V první fázi spočítáme vzájemnou polohu přímky, jíž je paprsek součástí, a roviny, ve které leží daný trojúhelník. Touto vzájemnou polohou může být rovnoběžnost nebo průsečík. Pro popis roviny π použijeme obecný tvar rovnice, tedy

$$(6) \quad \pi : a x + b y + c z + d = 0 ,$$

kde a , b , c jsou souřadnice normálového vektoru \vec{n}_π roviny, zatímco x , y , z jsou souřadnice libovolného bodu ležícího v rovině. Normálový vektor roviny \vec{n}_π lze získat jako vektorový součin dvou vektorů (vztah (7)), které odpovídají dvěma stranám trojúhelníka (viz obrázek 3.1). Parametr d je posunutí roviny vzhledem k počátku souřadnicového systému. Jeho hodnotu získáme dosazením jednoho z vrcholů trojúhelníka do rovnice roviny (6).



Obrázek 3.1: Vektory v trojúhelníku

$$(7) \quad \vec{n}_\pi = (V_2 - V_1) \times (V_3 - V_1)$$

Přímku popíšeme parametrickou rovnicí uvedenou ve vztahu (8), kterou lze pro jednotlivé souřadnice libovolného bodu ležícího na ní rozepsat do vztahu (9).

$$(8) \quad X = P + t \cdot \vec{s}$$

$$(9) \quad \begin{aligned} x &= P_x + t \cdot s_x \\ y &= P_y + t \cdot s_y \\ z &= P_z + t \cdot s_z \end{aligned}$$

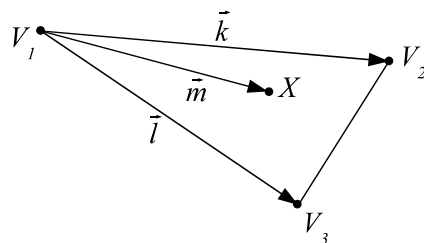
Ve vztahu (8) P představuje bod, kterým přímka prochází (výchozí bod paprsku), \vec{s} je směrový vektor přímky (paprsku) a t je parametr, jehož hodnota je libovolné číslo z intervalu $(-\infty; \infty)$.

Dosažením rovnice přímky (9) do rovnice roviny (6) a její upravením na rovnici (10) získáme hodnotu parametru t .

$$(10) \quad t = -\frac{a \cdot P_x + b \cdot P_y + c \cdot P_z + d}{a \cdot s_x + b \cdot s_y + c \cdot s_z}$$

Jmenovatel ve vztahu (10) je skalární součin normálového vektoru \vec{n}_π roviny a směrového vektoru přímky \vec{s} . Pokud je jeho hodnota rovna 0, paprsek je s rovinou rovnoběžný a průsečík X neexistuje. Jinak průsečík X existuje, a získáme jej dosažením hodnoty parametru t do rovnice (8).

Nyní se dostáváme ke druhé fázi algoritmu. V jejím rámci rozhodneme, zda-li daný průsečík X leží uvnitř trojúhelníku. K tomu použijeme tzv. barycentrických souřadnic [SEGU].



Obrázek 3.2: Bod uvnitř trojúhelníku vyjádřený vektorem.

Vycházíme z toho, že pozice každého bodu uvnitř trojúhelníku lze vyjádřit vektorem $\vec{m} = (X - V_1)$, který je lineární kombinací vektorů $\vec{k} = (V_2 - V_1)$ a $\vec{l} = (V_3 - V_1)$, které vyjadřují dvě strany trojúhelníku. Tuto lineární kombinaci vyjadřuje vztah (11).

$$(11) \quad \vec{m} = \alpha \cdot \vec{k} + \beta \cdot \vec{l}$$

Ve vztahu (11) jsou parametry α a β oněmi barycentrickými souřadnicemi bodu X v rámci trojúhelníku. Aby se bod X nacházel právě uvnitř trojúhelníku, musejí souřadnice splňovat následující podmínky:

$$(12) \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \alpha + \beta \leq 1.$$

Vzhledem k tomu, že se nyní nacházíme v rovině (dvourozměrném prostoru), musíme nejprve souřadnice trojúhelníku, který se nachází v trojrozměrném prostoru, přepočítat do oné roviny. Nejjednodušší cestou, jak z trojrozměrných souřadnic získat souřadnice dvourozměrné, je ignorování jedné ze souřadnic. To, kterou souřadnici budeme ignorovat, bude záviset na souřadnicích normálového vektoru \vec{n}_π . Budeme ignorovat tu souřadnici, která je v normálovém vektoru největší.

Pak můžeme vztah (11) rozepsat do jednotlivých souřadnic:

$$(13) \quad \begin{aligned} m_1 &= \alpha \cdot k_1 + \beta \cdot l_1 \\ m_2 &= \alpha \cdot k_2 + \beta \cdot l_2 \end{aligned}$$

Řešením této soustavy získáme vztah (14) pro výpočet barycentrických souřadnic.

$$(14) \quad \begin{aligned} \beta &= \frac{k_1 \cdot m_2 - m_1 \cdot k_2}{k_1 \cdot l_2 - l_1 \cdot k_2} \\ \alpha &= \frac{m_1 - \beta \cdot l_1}{k_1} \end{aligned}$$

Rozhodnutí, zda-li se nalezený průsečík X nachází v trojúhelníku, provedeme na základě ověření, jestli vypočtené barycentrické souřadnice splňují podmínky (12).

3.2 Průsečík paprsku s kulovou plochou

Budeme-li chtít vypočítat průsečík paprsku s kulovou plochou, budeme postupovat podobným způsobem jako v případě trojúhelníku. Vezmeme rovnici, která popisuje kulovou plochu, a do ní dosadíme rovnici, která popisuje přímku, v níž paprsek leží.

Rovnice kulové plochy je uvedena ve vztahu (15), kde x , y a z jsou souřadnice libovolného bodu na kulové ploše, zatímco x_0 , y_0 a z_0 jsou souřadnice středu kulové plochy. Parametr r představuje poloměr kulové plochy.

$$(15) \quad (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$$

$$(16) \quad \begin{aligned} a t^2 + b t + c &= 0 \\ a &= s_x^2 + s_y^2 + s_z^2 \\ b &= 2(s_x P_x + s_y P_y + s_z P_z - (s_x x_0 + s_y y_0 + s_z z_0)) \\ c &= P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - 2(P_x x_0 + P_y y_0 + P_z z_0) + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2 \end{aligned}$$

$$(17) \quad D = b^2 - 4ac$$

Pokud do rovnice kulové plochy (15) dosadíme parametrickou rovnici přímky (9), a upravíme ji pro parametr t , dostaneme vztah (16), který představuje kvadratickou rovnici pro neznámou t .

Při řešení této kvadratické rovnice prostřednictvím diskriminantu D (vztah (17)) mohou nastat tři situace:

- $D > 0$

V tomto případě má rovnice dvě řešení:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{4ac},$$

kteřé odpovídá situaci, kdy paprsek protíná kulovou plochu. S kulovou plochou mají tedy dva společné body. Nás zajímá především ten, který se nachází blíže, tedy ten, jehož t je menší.

- $D = 0$

Pro tuto hodnotu diskriminantu má rovnice jedno řešení:

$$t = -\frac{b}{4ac},$$

kteřé odpovídá situaci, při které se paprsek kulové plochy tečně dotýká a má s ní společný jeden bod.

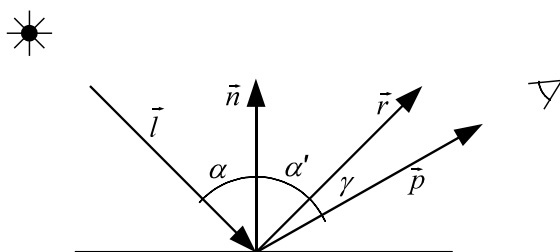
- $D < 0$

V tomto případě rovnice nemá řešení, což znamená, že paprsek nemá s kulovou plochou žádný společný bod a neprotíná ji.

Pokud paprsek kulovou plochu protíná, průsečík získáme opět dosazením parametru t do vztahu (8).

3.3 Phongův osvětlovací model

Pro výpočet osvětlení v místě průsečíku paprsku s trojúhelníkem je vhodný Phongův osvětlovací model [ŽÁRA]. Tento model patří do skupiny lokálních osvětlovacích modelů, které předpokládají pouze jedno těleso, takže neřeší vržené stíny ani interakci světla s více tělesy nebo s opticky aktivním prostředím. Phongův osvětlovací model vychází z představy, že odražené světlo se na povrchu tělesa skládá ze tří složek: ambientní, difúzní a zrcadlová.



Obrázek 3.3: Vektory (paprsky) Phongova osvětlovacího modelu

Ambientní složka je ta část světla, která na osvětlované těleso dopadá ze všech směrů rovnoměrně. Je nezávislá na vzájemné poloze zdroje světla, tělesa a pozorovatele. Určí se na základě vztahu (18), ve kterém I_A představuje množství okolního světla a koeficient r_a vyjadřuje schopnost povrchu odrážet ambientní světlo.

$$(18) \quad I_a = I_A \cdot r_a$$

Difúzní složka je část světla, která dopadá na těleso ze světelného zdroje a odráží se do všech směrů rovnoměrně. Její intenzita je závislá na vzájemné poloze normály k povrchu tělesa \vec{n} a dopadajícího paprsku světla \vec{l} (viz obrázek 3.3). Vypočítá se podle vztahu (19), kde I_L je intenzita světla přicházejícího od zdroje světla, koeficient r_d , který bývá totožný s koeficientem r_a ze vztahu (18), představuje míru zastoupení difúzního odrazu v celkově odraženém světle.

$$(19) \quad I_d = I_L \cdot r_d \cdot (\vec{l} \cdot \vec{n})$$

Zrcadlová složka je část světla, která dopadá na povrch tělesa ze světelného zdroje a odráží se podle zákona odrazu převážně v jednom směru odraženého paprsku \vec{r} . Intenzita zrcadlové složky závisí na vzájemné poloze světelného zdroje, povrchu tělesa a pozice pozorovatele; závisí na odchylce γ pohledového paprsku od odraženého paprsku. Určí se na základě vztahu (20), kde I_L opět představuje světlo dopadajícího paprsku, r_z vyjadřuje míru zastoupení zrcadlové složky a exponent h určuje „lesklost“ povrchu, tedy míru rozptylu zrcadlové složky. \vec{v} je vektor pohledu a určuje paprsek, který jde z povrchu k pozorovateli Vektor \vec{r} charakterizuje paprsek, který je odražen podle zákona odrazu. Vektor odraženého paprsku se spočítá na základě vztahu (21).

$$(20) \quad I_z = I_L \cdot r_z \cdot (\vec{v} \cdot \vec{r})^h$$

$$(21) \quad \vec{r} = 2 \cdot (\vec{l} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n} - \vec{l}$$

Výslednou intenzitu odraženého světla a tedy i míru osvětlení povrchu v daném místě vypočítáme jednoduchým sečtením ambientní, difúzní a zrcadlové složky tak, jak je uvedeno ve vztahu (22).

$$(22) \quad I_v = I_a + I_d + I_z$$

3.4 Optimalizace – urychlení výpočtu

Zjišťování vlastností (poloha, barva) místa dopadu paprsku (průsečík paprsku s povrchem tělesa) je obecně výpočetně velice náročné. Při vykreslování nejjednodušším algoritmem sledování paprsku je reálně sledován a počítán jeden primární paprsek pro každý jednotlivý pixel obrazovky, což při

vyšších rozlišení vede k neskutečně dlouhým vykreslovacím časům. Proto je třeba tyto výpočty optimalizovat a urychlovat.

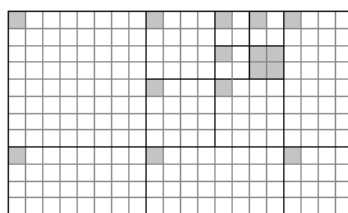
Metody, které takto urychlují vykreslování scény, lze rozdělit do dvou skupin. První skupina snižuje počet pixelů, ve kterých je počítán (sledován) příslušný primární paprsek. Do této skupiny patří metoda zvaná adaptivní podvzorkování, které se věnuje kapitola 3.4.1.

Druhá skupina optimalizačních metod snižuje počet objektů, se kterými musí daný paprsek interagovat, čímž se snižuje doba potřebná k vyhodnocení jednoho paprsku. Jednou z těchto metod se zabývá kapitola 3.4.2.

3.4.1 Adaptivní podvzorkování

Jak již bylo uvedeno v úvodu, metoda adaptivního podvzorkování patří mezi optimalizační techniky, které mají za úkol snížit dobu potřebnou k vykreslení obrazu scény tím, že sníží počet pixelů, které jsou vyhodnocovány³. Základní myšlenka této metody spočívá v rozdělení pixelů do skupin 8x8, 4x4, 2x2 a 1x1. Nejprve vyhodnotíme pixely v rozích těchto skupin (viz obrázek 3.4).

Pokud jsou si takto vyhodnocené pixely podobné (viz dále), jsou vnitřní pixely skupiny interpolovány (jejich barva, souřadnice do textury apod) mezi těmito rohovými pixely. Jinak je skupina rekurzivně rozdělena do čtyř podskupin, které jsou vyhodnocovány samostatně.



Obrázek 3.4: Pixely obrazu, které jsou reálně vyhodnocovány

Pixely jsou si podobné (ve smyslu metody adaptivního podvzorkování), pokud se v nich zobrazuje stejný objekt, pokud mají téměř stejnou barvu, pokud body, které jsou v daných pixelech promítnuty, buď oba leží ve stínu nebo mimo něj.

3.4.2 Obalová tělesa

V předchozím textu jsme si popsali jednu z metod, která přistupuje ke snížení doby vykreslení obrazu scény s tím, že snižuje počet vyhodnocovaných pixelů. V této části se podíváme na jiný přístup, v němž budeme zkracovat dobu vykreslení v rámci vyhodnocování jednoho pixelu tím, že snížíme počet objektů, se kterými bude příslušný primární paprsek interagovat⁴.

³ Vyhodnocení ve smyslu výpočtu barvy pixelu prostřednictvím primárního paprsku a jeho sledování.

⁴ Interakce paprsku s objektem spočívá v určení jejich průsečíku a v daném místě určit barvu na základě osvětlovacího modelu a povrchových vlastností objektu (barva, textura, ...)

Toho docílíme tak, že nebudeme počítat interakci paprsku s objekty, u kterých určitě víme, že jimi paprsek neprochází. Tuto informaci lze získat prostřednictvím pomocných objektů a datových struktur, které přiřadíme jednotlivým objektům scény.

Tyto pomocné objekty se nazývají *obalová tělesa*. Jejich využití spočívá v tom, že jimi daný objekt *obalíme* (viz dále), a před tím, než začneme vyhodnocovat interakci paprsku se samotným objektem, zjistíme, zda-li paprsek protíná příslušné obalové těleso. Pokud paprsek obalové těleso neprotíná, víme určitě, že neprotíná ani příslušný objekt scény, a nemůže s ním tedy ani interagovat.

Obalení objektu scény obalovým tělesem spočívá v umístění obalového tělesa vzhledem k objektu scény tak, aby:

- objem obalového tělesa byl co možná nejnižší a
- objekt scény, který obalujeme, leží celý uvnitř obalového tělesa.

Jedním z nejjednodušších takovýchto obalových těles je koule. Podívejme se nyní, jakým způsobem můžeme objekty scény obalit pomocí koule.

Koule je ve scéně popsána jednak středem, který popisuje její polohu, a poloměrem, který určuje její velikost. Toto jsou parametry, které musíme určit, abychom mohli koulí obalit příslušný objekt scény.

Předpokládejme, že všechny objekty, které se nacházejí ve scéně, jsou popsány tak, že jejich povrch se skládá z trojúhelníků, a ty zase z vrcholů.

Střed koule pak určíme tak, že jeho poloha je dána průměrem všech vrcholů daného tělesa, zatímco poloměr koule zjistíme jako vzdálenost středu koule a vrcholu, který leží od středu nejdále. Pro určení středu obalové koule můžeme využít aritmetického průměru (vztah (23)) nebo geometrického průměru (vztah (24)).

$$(23) \quad s_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ij}$$

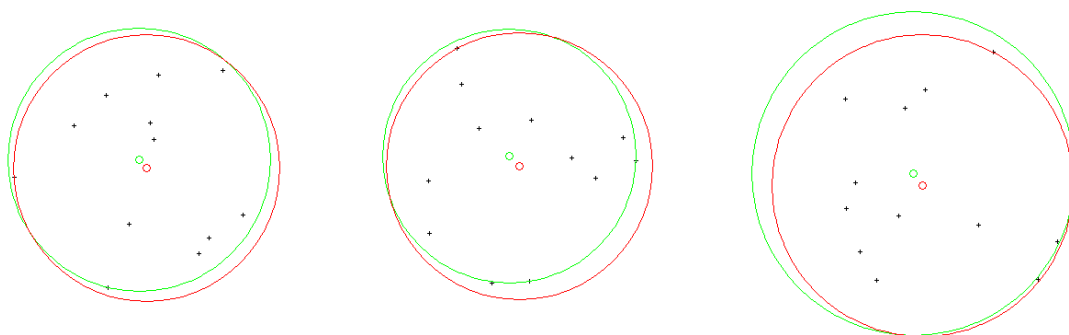
$$(24) \quad s_j = \left(\prod_{i=1}^n p_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ve vztazích (23) a (24) s_j představuje j -tou souřadnici pozice středu obalové koule, zatímco p_{ij} označuje j -tou souřadnici pozice i -tého vrcholu tělesa, přičemž těleso je složeno z n vrcholů.

Tento přístup naznačuje obrázek 3.5, na kterém je také vidět, že pro vytvoření obalové koule příliš nezáleží, použijeme-li aritmetický či geometrický průměr.

Vzhledem k tomu, že výpočet geometrického průměru je výpočetně náročnější než výpočet aritmetického průměru, použijeme pro vytvoření obalové koule právě aritmetický průměr.

Další možností urychlení výpočtu je seskupení obalových těles do hierarchických struktur. Více informací o tomto lze získat v [ŽÁRA].



Obrázek 3.5: Sestavení obalové koule nad množinou vrcholů tělesa. Aritmetický průměr - červená, geometrický průměr - zelená.

Samotné určení, zda-li paprsek protíná obalovou kouli, provedeme postupem, který je uveden v kapitole 3.2.

4 Matematický model kamery

Kamera je objekt, který zaznamenává (snímá) obraz okolní scény. Prostor okolní scény je trojrozměrný, ale prostor obrazu kamery, který se vykresluje na obrazovku, je dvourozměrný. Tato transformace trojrozměrné scény do dvourozměrného obrazu se nazývá *promítání*. Plocha, na kterou se obraz promítá, se nazývá *průmětna*. Vzhledem k tomu, že se pohybujeme v rámci počítačové grafiky a obraz průmětny se vykresluje do rastru zobrazovacího zařízení, je tento obraz před vykreslením rasterizován.

Prostor obrazu je tedy diskrétní a dvourozměrný a je složen z pixelů. Každý pixel má v rámci obrazu své jednoznačné souřadnice (i, j) . Tyto souřadnice jsou parametrické a jejich hodnota se pohybuje v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$ (střed obrazu je na souřadnicích $(0, 0)$). Vzhledem k tomu ale, že se kamera také nachází ve scéně, mají tyto pixely také trojrozměrné souřadnice v rámci scény $O(i, j)$. Připomeňme, že se zabýváme technikou sledování paprsku, při které je každý pixel vyhodnocován tak, že je z něj vyslán paprsek určitým směrem a sleduje se jeho cesta scénou.

Paprsek je popsán výchozím bodem a směrovým vektorem (viz kapitola 2.1). Výchozím bodem každého paprsku bude pozice příslušného pixelu v rámci trojrozměrné scény. Směrový vektor paprsku zjistíme na základě modelu kamery. Při hledání modelu kamery budeme hledat nějakou funkci φ , která danému pixelu na souřadnicích (i, j) přiřadí směrový vektor paprsku, který z daného pixelu vychází, jak je uvedeno ve vztahu (25), kde O je prostor obrazovky a V představuje vektorový prostor vztažený k souřadnicovému systému kamery.

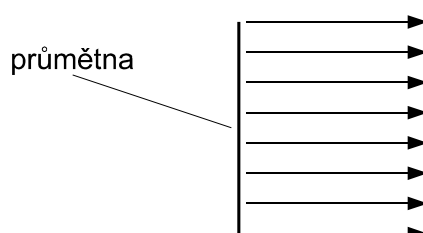
$$(25) \quad \begin{aligned} \varphi: O &\rightarrow V \\ \vec{s}_{ij} &= \varphi(i, j) \end{aligned}$$

Kamera je také objektem, který definuje pozici a orientaci pozorovatele ve scéně a směr, kterým se pozorovatel dívá. Tuto informaci lze také popsat paprskem, jehož výchozí bod P_k představuje počátek souřadného systému kamery a směrový vektor \vec{s}_k udává směr pohledu kamery. Tento paprsek budeme nazývat *pohledový paprsek*.

4.1 Teoretický popis kamer

4.1.1 Plošná kamera

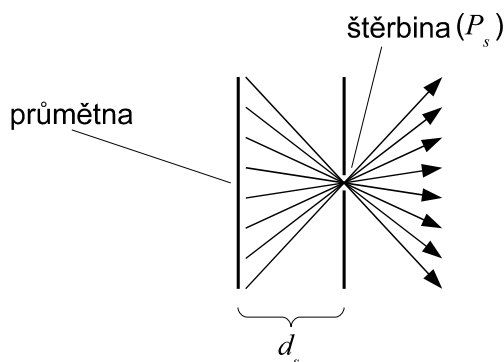
Nejjednodušší transformací z trojrozměrného prostoru scény do dvourozměrného prostoru průmětny je promítnutí do některé ze souřadnicových rovin. Toto promítání se nazývá *rovnoběžné* (paralelní) *promítání* [ŽÁRA]. Tímto promítáním se vyznačuje plošná kamera. Všechny primární paprsky jsou rovnoběžné (viz obrázek 4.1) a vycházejí z jednotlivých pixelů průmětny ve stejném směru jako pohledový paprsek kamery – jejich směrový vektor je tedy stejný.



Obrázek 4.1: Plošná kamera -
rovnoběžné promítání

4.1.2 Dírková kamera

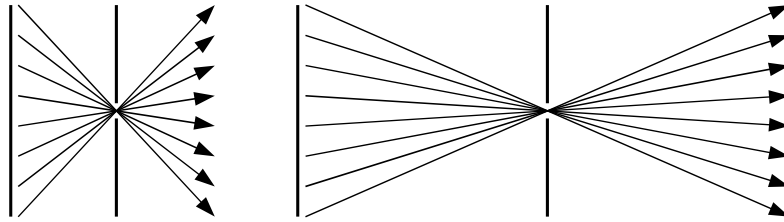
Dírková kamera [RENN] představuje promítání, které je nejbližší lidskému vnímání. Scéna je opět promítána na rovinnou plochu; ovšem v tomto případě se jedná o *středové* (perspektivní) *promítání*. Před průmětnou je umístěna neprůsvitná stěna, ve které je štěrbinou, kterou procházejí paprsky (viz obrázek 4.2). V ideálním případě je štěrbinou nekonečně úzká a představuje bod P_s , kterým procházejí všechny paprsky. Bod P_s je zároveň středem promítání.



Obrázek 4.2: Dírková kamera - středové
promítání

Se středovým promítáním souvisí pojem *zorný úhel*, který definuje tu část prostoru scény, kterou je kamera schopna promítat. Stěna se štěrbinou je umístěna před průmětnou ve vzdálenosti

d_s . Jak je naznačeno na obrázku 4.3, velikost zorného úhlu je závislá na poměru této vzdálenosti a rozměrů průmětny.

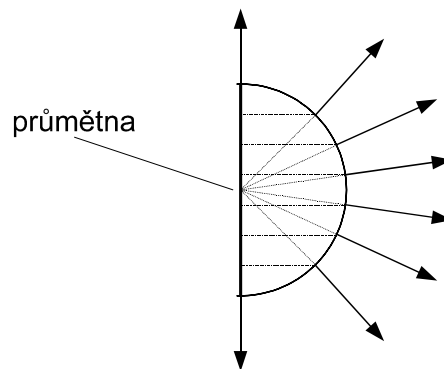


Obrázek 4.3: Závislost velikosti zorného úhlu na vzdálenosti štěrbin

4.1.3 Sférická kamera – rybí oko

V případě kamery typu „rybí oko“ se jedná v podstatě o extrémně širokouhlou kameru jejíž zorný úhel se v reálném případě blíží ideálním 180° (ve světě počítačové grafiky je možné promítat i kamerou se zobrazovacím úhlem 360°). Na rozdíl od dírkové kamery, kde dochází k promítání na rovinnou plochu, lze promítání této kamery popsat jako promítání na kulovou (sférickou) plochu (proto se nazývá také sférická kamera), které lze snadno promítnout do roviny obrazu. V případě této kamery ovšem výchozími body jednotlivých paprsků nejsou příslušné pixely průmětny, ale je jím jediný bod, který je společný pro všechny paprsky - tímto bodem je střed pomyslné koule.

Na obrázku 4.4 jsou znázorněny paprsky, které přísluší jednotlivým pixelům obrazu.



Obrázek 4.4: Sférická kamera - rybí oko (180°)

Podobný přístup je popsán například v [SHIG].

4.2 Řešení

4.2.1 Plošná kamera

Hledaná funkce φ , která je uvedena ve vztahu (26), přiřadí každému primárnímu paprsku směrový vektor pohledového paprsku kamery.

$$(26) \quad \varphi(i, j) = \vec{s}_k$$

Výchozím bodem primárních paprsků je příslušný pixel průmětny $O(i, j)$. Tímto způsobem máme zajištěno, že všechny primární paprsky budou rovnoběžné, což odpovídá principu plošné kamery, který je popsán v kapitole 4.1.2.

4.2.2 Dírková kamera

Funkce φ , která popisuje dírkovou kameru, je uvedena ve vztahu (27). Tato funkce přiřazuje paprsku každého pixelu směrový vektor, který je dán dvěma body: příslušný pixel $O(i, j)$ a bod štěrbiny P_s .

$$(27) \quad \begin{aligned} \varphi(i, j) &= (P_s - O(i, j)) \\ P_s &= P_k + d_s \cdot \vec{s}_k \end{aligned}$$

Stejně jako u plošné kamery je výchozím bodem primárních paprsků příslušný pixel průmětny $O(i, j)$. Tento přístup odpovídá principu dírkové kamery popsanému v kapitole 4.1.2.

4.2.3 Sférická kamera

Funkce φ pro popis sférické kamery podle obrázku 4.4 by mohla vypadat tak, jak je uvedeno ve vztahu (28), kde M představuje transformační matici, která vznikne složením dvou dílčích matic, M_ω a M_ψ . \vec{s}_k představuje nám již známý směrový vektor pohledového paprsku.

$$(28) \quad \begin{aligned} \varphi(i, j) &= M \cdot \vec{s}_k \\ M &= M_\omega \cdot M_\psi \\ \omega &= \sin^{-1}(v) \\ \psi &= \sin^{-1}\left(\frac{j}{v}\right) \\ v &= \sqrt{i^2 + j^2} \end{aligned}$$

Rotační matice M_ω vychýlí paprsek od pohledového paprsku, který představuje osu pomyslné polokoule, o úhel ω , jehož velikost je závislá na vzdálenosti v příslušného pixelu od středu.

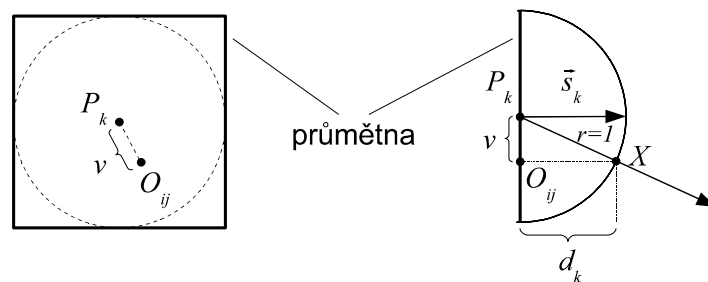
Rotační matice M_ψ natočí paprsek kolem osy, kterou je pohledový paprsek, o úhel ψ , jehož velikost je rovněž závislá na pozici příslušného pixelu v rámci obrazu.

Tento přístup, během něhož postupně otáčíme směrovým vektorem směrového paprsku, je sice principiálně jednoduchý, ale vzhledem k tomu, že získání matice M_ψ pomocí vztahu (29) [ŽÁRA], kde I je jednotková matice, zatímco s_x , s_y a s_z jsou souřadnice směrového vektoru \vec{s}_k , představuje poněkud komplikovaný výpočet, musíme se na problém podívat z jiného pohledu.

$$(29) \quad M_\psi = \cos \psi \cdot I + (1 - \cos \psi) \cdot \begin{bmatrix} s_x^2 & s_x s_y & s_x s_z & 0 \\ s_x s_y & s_y^2 & s_y s_z & 0 \\ s_x s_z & s_y s_z & s_z^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \sin \psi \cdot \begin{bmatrix} 0 & -s_z & s_y & 0 \\ s_z & 0 & -s_x & 0 \\ -s_y & s_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

K získání směrového paprsku primárního paprsku pro daný pixel průmětny opět využijeme pozici pixelu $O(i, j)$ a směrový vektor pohledového paprsku \vec{s}_k . Směrový vektor primárního paprsku můžeme získat ze dvou bodů (viz kapitola 2.1). Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1.3, výchozím bodem primárních paprsků je počátek souřadného systému kamery P_k , který definuje pozici pozorovatele ve scéně.

Abychom získali koncový bod primárního paprsku X , předpokládejme, že leží na povrchu koule (viz kapitola 4.1.3), která má střed v bodě P_k a poloměr $r=1$. Vlastní bod X získáme tak, že posuneme příslušný pixel $O(i, j)$ ve směru směrového vektoru pohledového paprsku \vec{s}_k o takovou vzdálenost d_k , že koncový bod umístíme na povrch oné pomyslné koule (viz obrázek 4.5). Vzdálenost d_k určíme na základě Pythagorovy věty v trojúhelníku $\Delta P_k X O_{ij}$.



Obrázek 4.5: Určení směrového vektoru primárního paprsku příslušného pixelu u sférické kamery.

Výpočet funkce φ tedy bude vypadat tak, jak je uvedeno ve vztahu (30).

$$(30) \quad \begin{aligned} \varphi(i, j) &= (X - P_k) \\ X &= O(i, j) + d_k \cdot \vec{s}_k \\ d_k &= \sqrt{1 - v^2} \\ v^2 &= i^2 + j^2 \end{aligned}$$

Až do tohoto okamžiku jsme se bavili o sférické kameře, která modeluje objektiv rybí oko s úhlem 180° . Jak bylo uvedeno v kapitole 4.1.3, sférická kamera může také modelovat takový objektiv, jehož zorný úhel je celých 360° . Abychom toho dosáhli, budeme muset upravit výpočet vzdálenosti d_k v závislosti na vzdálenosti pixelu od středu průmětny tak, aby obsáhla celou plochu koule, a tedy celých 360° .

$$(31) \quad d_k = \begin{cases} \sqrt{1-4v^2} & : v \in \left\langle 0; \frac{1}{2} \right\rangle \\ -\sqrt{1-4(v-1)^2} & : v \in \left\langle \frac{1}{2}; 1 \right\rangle \end{cases}$$

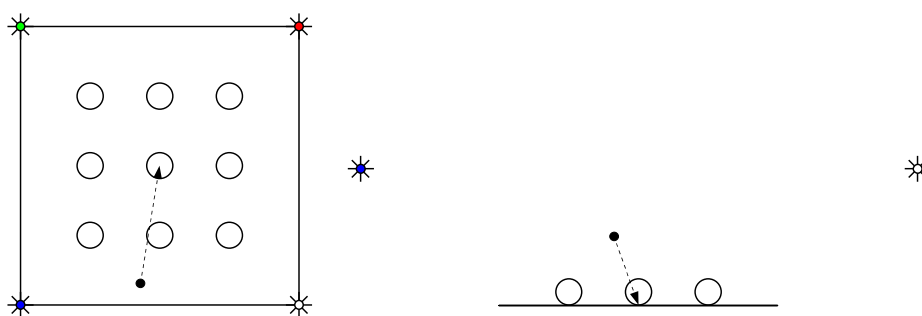
Tato úprava spočívá v tom, že pokud je vzdálenost v v první polovině svého rozsahu, tedy její hodnota je v intervalu $\left\langle 0; \frac{1}{2} \right\rangle$, pak se budeme pohybovat na přední polokouli, zatímco v intervalu $\left\langle \frac{1}{2}; 1 \right\rangle$ se koncový bod směrového vektoru primárního paprsku nachází na druhé polokouli, která leží za průmětnou. Výpočet d_k pak bude vypadat tak, jak je uveden ve vztahu (31).

5 Srovnání kamer

Pojďme se nyní podívat na jednotlivé kamery s pohledu srovnání jejich vlastnosti. Abychom mohli kamery srovnávat, musíme si nejprve definovat charakteristiky, podle kterých to budeme provádět. Jsou jimi parametry kamer a vliv jejich změny na tyto parametry.

Srovnání provedeme prostřednictvím promítnutí scény jednotlivými kamerami, přičemž budeme pro každé takové promítnutí měnit parametry příslušných kamer. Přitom budeme sledovat, jak se obraz promítnuté scény změnil.

Scéna, kterou použijeme pro tato srovnání v rámci této kapitoly, je velice jednoduchá. Její konfigurace je naznačena na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Konfigurace scény pro srovnání vlastností kamer.

Scéna obsahuje vodorovnou čtvercovou desku, na které je položeno 9 koulí v matici 3x3. Nad těmito koulemi jsou ve čtvercové síti umístěny 4 bodové zdroje zdroje světla, přičemž barva jejich světla je červená, zelená, modrá, a bílá. Pro samotné promítání (vykreslování) použijeme program *SewerRT* (kapitola 7), který scénu vykresluje metodou sledování paprsku. Ta je popsána v kapitole 3. Tvorba tohoto programu, který je kompletně napsaný v jazyce Java, je součástí této práce a je k nalezení na příloženém datovém médiu.

Budeme srovnávat, jakým způsobem se tyto charakteristiky projeví na obrazu scény, který se bude vykreslovat do průmětny – na obrazovku. Srovnávaným charakteristikám se věnuje následující kapitola.

5.1 Charakteristiky kamer

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, charakteristiky, které nám umožní jednak popsat, ale také srovnat vlastnosti jednotlivých typů kamer, zahrnují nejen různé parametry samotných kamer, ale také vliv jejich změny na vlastnosti kamer.

Parametry, kterými se budeme dále zabývat, jsou pozice pozorovatele (kamery) ve scéně, která je definována počátkem soustavy souřadnic kamery. Pozici kamery budeme zkoumat v tom smyslu,

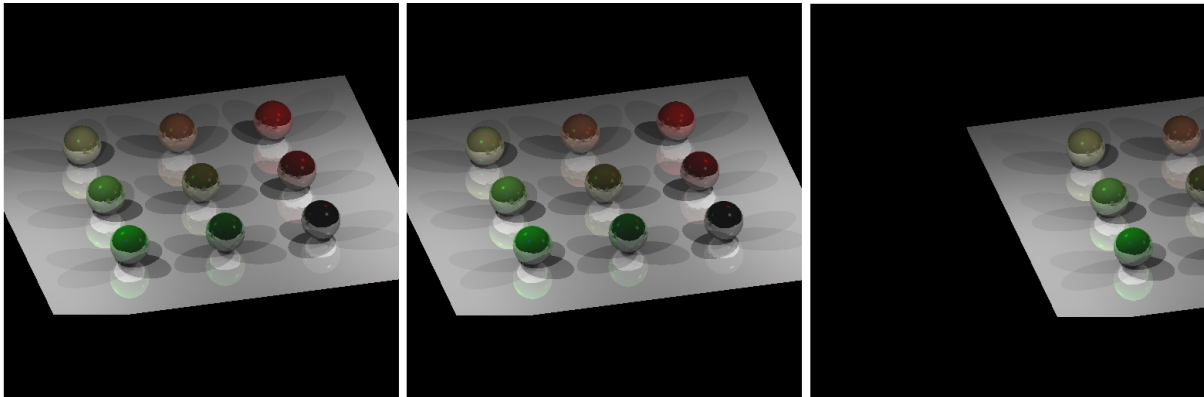
že budeme s kamerou pohybovat vůči scéně. Budeme kamerou uhýbat vlevo a pohybovat s ní zpět ve směru pohledu – *couvat* s ní⁵.

Další charakteristikou, kterou se budeme zabývat, jsou rozměry samotné průmětny, do které se promítá (vykresluje) obraz scény. Nejprve vykreslíme scénu s kamerou ve výchozí konfiguraci a poté zvýšíme rozměry průmětny na dvojnásobnou hodnotu a opět vykreslíme.

Dále budeme sledovat *zobrazovací objem*⁶ a s tím související zorný úhel kamery.

5.2 Plošná kamera

S plošnou kamerou to bude velice jednoduché. Vzhledem k tomu, že všechny primární paprsky jsou rovnoběžné a mají směr shodný se směrem směrového vektoru pohledového paprsku (viz kapitola 4.1.1), je zobrazovacím objemem kvádr, jehož podstavou je průmětna kamery. Z toho vyplývá, že o zorném úhlu v případě plošné kamery nemá smysl hovořit.



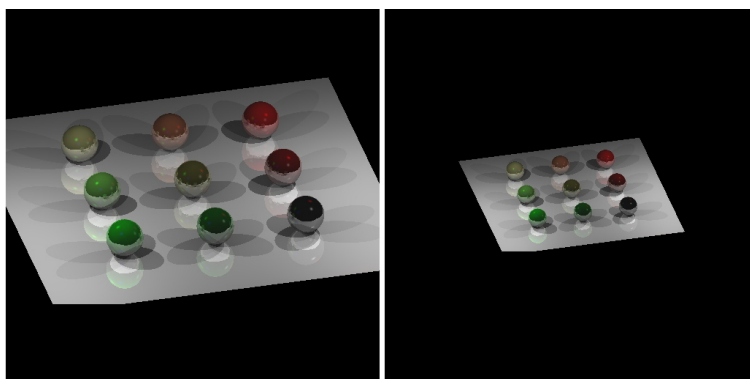
Obrázek 5.2: Vliv změny polohy plošné kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.

Podíváme-li se na to, jakým způsobem se projeví změna vzájemné polohy kamery a scény (viz obrázek 5.2), uvidíme, že v případě couvání kamery k žádné změně nedošlo, což je pochopitelné, neboť zobrazovací objem kamery zůstal stejný; jediné, co se změnilo, je poloha podstavy kvádrů (průmětny).

V případě uhýbání kamery vlevo došlo pouze ke stejnému posunu zobrazovacího objemu, a tudíž i k posunu obrazu na průmětně v opačném směru.

⁵ Směr změny polohy kamery vztahujeme ke směru pohledu ve výchozí konfiguraci kamery.

⁶ Část prostoru, který kamera promítá na průmětnu.



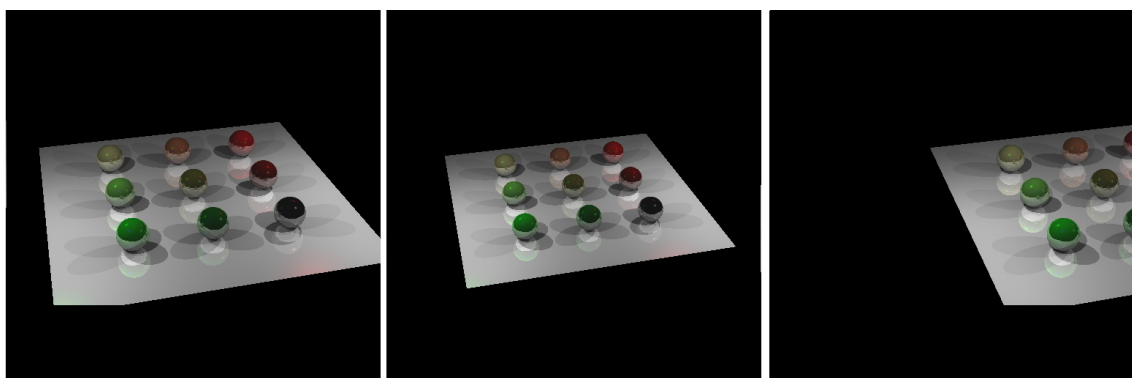
Obrázek 5.3: Vliv změny rozměrů průmětny plošné kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, dvakrát větší průmětna.

Nyní se budeme zabývat změnou rozměrů průmětny. Pokud zvětšíme rozměry průmětny, zobrazovací objem zůstane kvádrem, ovšem jeho objem vzroste. Jak ukazuje obrázek 5.3, dojde ke zmenšení celého obrazu v měřítku, které odpovídá převrácenému měřítku změny rozměrů průmětny. To znamená, že když jsme rozměry průmětny zvětšili na dvojnásobek původních rozměrů, obraz scény se zmenšil na polovinu.

5.3 Dírková kamera

Dírková kamera se vyznačuje tím, že primární paprsky procházejí jediným bodem – štěrbinou (viz kapitola 4.1.2). Vzhledem k tomu, že průmětna má tvar obdélníku, tak zobrazovací objem představuje čtyřboký jehlan, jehož vrchol leží ve štěrbině kamery a jehož osa odpovídá směrovému vektoru pohledového paprsku kamery.

Zaměříme nyní svoji pozornost na vzájemnou polohu kamery a scény, jejíž vliv ukazuje obrázek 5.4.



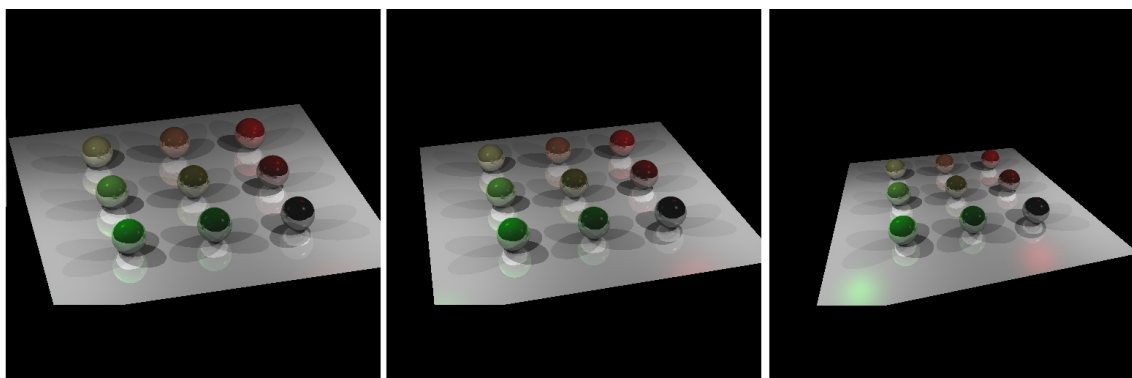
Obrázek 5.4: Vliv změny polohy dírkové kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.

Když promítneme scénu prostřednictvím dírkové kamery, která zobrazuje scénu středovým promítáním (viz kapitola 4.1.2), pak se podle zákonů perspektivy vzdálenější objekty zobrazí jako menší. Pokud tedy couvneme s kamerou, dojde ke zvětšení vzdálenosti scény od kamery, a obraz scény bude tedy menší.

V případě, kdy uhneme s kamerou vlevo, dojde nejen k posunu zobrazovacího objemu, ale (na rozdíl od plošné kamery, u které se jinak obraz nezmění) i ke změně samotného obrazu. To je způsobeno tím, že primární paprsky, které odpovídají posunutým pixelům, mají v případě dírkové kamery jiný směr (u plošné kamery měly všechny paprsky shodný směr).

Už jsme si řekli, že zobrazovacím objemem u dírkové kamery je čtyřboký jehlan s vrcholem ve šterbině kamery. Zorný úhel kamery odpovídá úhlu rozevření tohoto jehlanu. Jak je uvedeno v kapitole 4.1.2, toto rozevření je určeno relativním poměrem rozměrů průmětny a vzdálenosti dírkové kamery od průmětny. Tento poměr, a spolu s ním i zorný úhel kamery, lze upravit změnou rozměrů průmětny nebo vzdáleností šterbiny od průmětny.

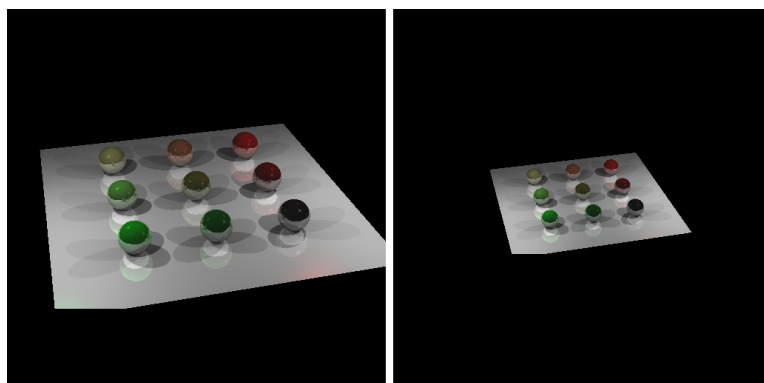
Zorný úhel kamery je velice důležitým parametrem, neboť jeho hodnota určuje míru perspektivního zkreslení a také relativní zvětšení obrazu scény (viz obrázek 5.5).



Obrázek 5.5: Vliv velikosti zorného úhlu dírkové kamery na obraz scény. Zleva: 22,5°, 45°, 90°.

Jak je vidět na obrázku 5.5, tak platí, že čím větší je zorný úhel, tím větší je míra perspektivního zkreslení obrazu scény, ale také jeho relativní zvětšení.

Také si můžeme všimnout, že při nízkých hodnotách zorného úhlu se obraz dírkové kamery blíží obrazu kamery plošné.

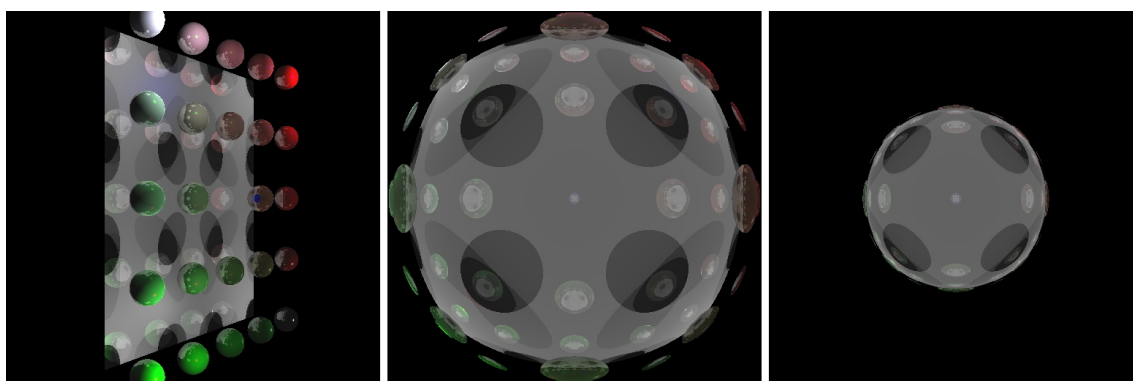


Obrázek 5.6: Vliv změny rozměrů průmětny dírkové kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, dvakrát větší průmětna.

Změna rozměrů průmětny se projeví podobným způsobem jako v případě plošné kamery, jak ukazuje obrázek 5.6.

5.4 Sférická kamera

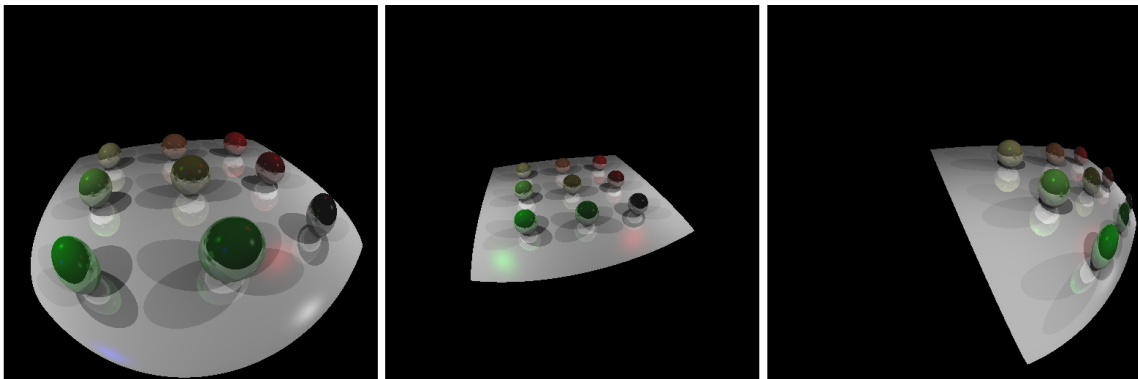
Sférická kamera je vzhledem ke své podstatě komplikovanější než předchozí dva typy kamery. Z jejího principu, kterým je promítání scény prostřednictvím kulové plochy (viz kapitola 4.1.3), vyplývá, že v případě 180° zorného pole je jejím zobrazovacím objemem poloprostor, který je ohraničen rovinou průmětny, a nachází se ve směru pohledového paprsku od této roviny. Vše, co se nachází v tomto poloprostoru, se tedy do průmětny promítne. Ta část scény, kterou prochází pohledový paprsek, se zobrazí uprostřed průmětny, zatímco objekty, které se nacházejí v prostoru, který je více odkloněn od směru pohledu kamery, jsou promítnuty dále od středu průmětny (viz obrázek 5.7).



Obrázek 5.7: Promítnutí scény sférickou kamerou. Zleva: konfigurace scény (modrá kulička představuje sférickou kameru), 180° obraz scény, 360° obraz scény.

V případě 360° zorného pole, je zobrazovacím objemem celý prostor. Jinak platí to samé, co pro 180° kameru s tím rozdílem, že objekty, které se nacházejí před rovinou průmětny, se zobrazí

do té části průmětny, která se nachází ve vzdálenosti $v < 0,5$ od středu, zatímco objekty za rovinou průmětny se promítnou do části, která je ve větší vzdálenosti.



Obrázek 5.8: Vliv změny polohy sférické kamery (180°) na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.

Pojďme se nyní podívat, jakým způsobem se projeví změna polohy kamery vzhledem ke scéně na jejím obrazu. Tento vliv ukazuje obrázek 5.8. Stejně jako u dírkové kamery, projevují se i v případě sférické kamery zákony perspektivy. Projevuje se tu tedy ten jev, že čím dále se objekt vzhledem k pozorovateli nachází, tím se jeví menší. Na rozdíl od dírkové kamery však perspektivní zkreslení není lineární, ale sférické, čehož se často využívá (viz kapitola 6.3).

Pokud tedy s kamerou couvneme, dojde pouze k posunu ohraničující roviny, kterou je rovina průmětny, a tím vzroste vzdálenost kamery od scény. To se projeví tak, že se scéna promítne jako menší. V případě uhnutí kamerou zůstane rovina ohraničující zobrazovaný objem zachována; dojde ovšem k posunu středu pomyslné koule, a tím i k posunu pohledového paprsku, jehož průmět scény se zobrazí do středu průmětny. Objekty jsou promítnuty stejně, ale do jiné části průmětny.

Vzhledem k tomu, že se obraz scény promítá prostřednictvím kulové plochy o jednotkovém poloměru, nemá smysl zkoumat vliv změny rozměrů průmětny na obraz scény.

6 Použití kamer

V rámci této kapitoly se podíváme na jednotlivé typy kamer z pohledu jejich použití. U každé ho typu si popíšeme, pro kterou situaci je příslušný typ kamery vhodný.

6.1 Plošná kamera

Plošná kamera promítá scénu rovnoběžným promítáním (viz kapitola 4.1.1), u kterého se neprojevuje žádné perspektivní zkreslení ani jiné jevy, které deformují obraz. Z toho důvodu lze tento typ kamery použít pro simulaci plošných snímacích zařízení, jakým je například scanner.

Další možností, jak použít tento typ kamery, je pro pořizování ortofotomap, nebo-li leteckých snímků terénu pro kartografické účely. Takovéto snímky nejsou zatíženy perspektivním zkreslením a jsou tedy ideální pro tvorbu spolehlivých a přesných map.

6.2 Dírková kamera

Tento typ kamery zaznamenává obraz scény prostřednictvím středového promítání (viz kapitola 4.1.2), které je velmi blízké lidskému zraku. Vzhledem k této vlastnosti lze tento typ kamery použít všude tam, kde by se v reálném světě použila běžná fotografická technika, pomocí které se snímá obraz za účelem zaznamenání obrazu pro člověka.

Další možností použití tohoto typu kamery je snímání obrazu scény takovým způsobem, jakým by scénu viděl člověk.

Tento typ kamery naopak není vhodný v situacích, ve kterých by se používala plošná kamera. U dírkové kamery se totiž projevuje perspektivní zkreslení, které deformuje obraz tak, že se vzdálenější objekty zobrazí jako menší.

6.3 Sférická kamera

Sférická kamera simuluje objektiv typu rybí oko, proto ji lze použít v situacích, ve kterých by se v reálném světě používal tento typ objektivu – umělecké snímky, které využívají sférického zkreslení perspektivy. Další možností je použití u dveřního kukátka, kde se využívá toho, že se promítá celý prostor před dveřmi, které jsou v rovině průmětny kamery.

Použití nachází při snímání velkého prostoru, například při záznamech z jednání, kdy se promítne celá scéna najednou. Takovýto obraz nabízí možnost přehledu o scéně v celém okolí kamery (pozorovatele).

Tento typ kamery lze použít v aplikacích, ve kterých se vyžaduje kompletní obraz okolí pozorovatele, kterým by mohl být například mobilní robot. Ten by tento obraz po dalším zpracování mohl využívat pro svou navigaci [SHIG].

7 Implementace - SewerRT

Jak bylo zmíněno v kapitole 5, pro účely této práce byl implementován program, který pomocí metod a technik, které jsou v této práci popsány, vykresluje danou scénu. Je kompletně implementován v objektově orientovaném programovacím jazyce Java a je tedy přenosný, přeložitelný a spustitelný na libovolné platformě, na které je možné spustit běhové prostředí Java Standart Edition [JAVA]. Zdokumentované zdrojové kódy i samotný přeložený program je k nalezení na přiloženém datovém médiu.

V následující kapitole se podíváme na jeho implementaci. Jak již bylo uvedeno dříve, jedná se o objektově orientovaný program, a proto si popíšeme jednotlivé třídy. Struktura a vazby základních tříd je ukázána v příloze 1 v diagramu tříd.

7.1 Popis programu

Jádrem programu je objekt třídy `RayTracer` (dále jen „raytracer“), který implementuje samotný algoritmus sledování paprsku tak, jak je popsán v rámci kapitoly 3. Vykresluje scénu, která je definována objektem třídy `Scene`, prostřednictvím kamery, kterou představuje objekt jedné ze tříd, které jsou potomky třídy `AbstractCamera`, která určuje abstraktní rozhraní kamery, se kterou umí raytracer pracovat. Poloha pozorovatele, kterého kamera reprezentuje, je popsána pozicí kamery a orientací ve scéně. Průmětna kamery je charakterizována obdélníkovým výřezem roviny, jejíž poloha ve scéně je dána právě polohou pozorovatele. Rozměry, které má průmětna v rámci scény, jsou určeny prostřednictvím atributů `realWidth` a `realHeight`, zatímco rozměry vykresleného obrazu scény⁷ určují atributy `screenWidth` a `screenHeight`.

Kamera, která se používá pro vykreslování metodou sledování paprsku není ničím jiným, než generátorem primárních paprsků, které raytracer sleduje a vyhodnocuje. Pro generování primárních paprsků, které patří pixelu na příslušných souřadnicích, slouží metoda `getPrimaryRay`. Tato metoda, která generuje vlastní primární paprsky, využívá metod `getRayOrigin` a `getRayDirection`, které jsou abstraktní. Tyto metody jsou implementovány až v potomcích této abstraktní třídy, protože každý konkrétní typ kamery generuje paprsky jiným způsobem.

Jak ukazuje diagram v příloze 1, potomci třídy `AbstractCamera` jsou tři a odpovídají modelům kamery, kterými se tato práce teoreticky zabývá v kapitole 4. Plošná kamera je reprezentována objektem třídy `PlainCamera`, dírkovou kameru modeluje objekt třídy `PinholeCamera`, která kromě povinných metod implementujících samotný generátor paprsků obsahuje i další atributy, kterými jsou zorný úhel `fieldOfView` spolu s pozicí a vzdáleností

⁷ Jedná se o rastrový obraz složený z pixelů.

štěrbiny. Poslední typ - sférickou kameru - modelující objektiv typu rybí oko reprezentuje objekt třídy `FisheyeCamera`. Tato třída mimo povinných metod obsahuje navíc definici typu sférické kamery `cameraType`, který určuje, zda se jedná o 180° nebo 360° kameru.

Jak je uvedeno v kapitole 3, algoritmus sledování paprsku je rekurzivní, a proto raytracer umožňuje řízení hloubky rekurze svým atributem `recursionDeep`.

Aby bylo možné vykreslovat fotorealistické obrazy scény, je potřeba ve scéně definovat jeden či více zdrojů světla. Tyto zdroje světla jsou definována prostřednictvím objektů třídy `Light` a jsou součástí scény. V současné době v programu `SewerRT` existují pouze bodová světla. Tato světla jsou popsána svou pozicí ve scéně, intenzitou a barvou světla.

Scéna v našem případě může obsahovat až 8 světel, ale program je navrhnut tak, aby bylo možné snadno tento počet zvýšit.

Součástí scény jsou kromě světel samozřejmě i samotné objekty scény, které budeme pro jednoznačnost nazývat tělesa. Tělesa jsou zde reprezentována pomocí objektů tříd, které jsou potomkem abstraktní třídy `AbstractObject`. Obecné těleso scény je popsáno svou pozicí, které je dáno počátkem lokálního souřadného systému `pivot`. S každým tělesem je svázána obalující koule, která je objektem třídy `BoundingSphere`. Tato obalující koule se používá pro optimalizaci a urychlení výpočtu obrazu scény a je popsána svým středem `pivot` a poloměrem `radius`. Každé těleso scény umí prostřednictvím své metody `CrossRay` určit svůj průsečík s paprskem, který je parametrem této metody. Další velice důležitou metodou každého tělesa je metoda `updateBoundingSphere`, která vytvoří nebo upraví obalovou kouli svázanou s daným tělesem tak, aby se dala použít pro optimalizaci.

Konkrétních těles je definováno několik (viz příloha 1) a všechny implementují tyto metody svým způsobem.

Další třídy, které popisují základní geometrii, jsou ukázány v diagramu v příloze 2. Jsou jimi třídy `Point3D`, která představuje bod ve trojrozměrném prostoru, `Vector3`, která reprezentuje třísloužkový vektor, `ColorRGB` modelující barvu v barevném modelu RGB. Všechny tyto třídy jsou potomky obecné třídy `Float3`, která popisuje obecnou třísloužkovou strukturu. Další takovou základní třídou je třída `Ray` reprezentující jeden paprsek. Ta je složena z výchozího bodu (objekt třídy `Point3D`) a směrového vektoru (objekt třídy `Vector3`) (viz kapitola 2.1). Vrcholy tělesa jsou reprezentovány objekty třídy `Vertex` a popisují jeho pozici, barvu, normálu k povrchu tělesa a souřadnici do textury.

8 Závěr

V rámci této práce byly prostudovány a teoreticky popsány základy optiky, mezi které patří přímočaré šíření světla, odraz a lom světla na rozhraní dvou prostředí a dále útlum světla.

Práce dále podrobně popisuje problematiku vykreslování trojrozměrné scény metodou sledování paprsku včetně optimalizačních technik pro urychlení výpočtu obrazu scény. Popisuje techniku adaptivního podvzorkování a využití obalových koulí.

V další části byly prostudovány a popsány matematické modely kamery pro vykreslování trojrozměrné scény metodou sledování paprsku.

Práce se zabývá modelem plošné kamery, která snímá obraz scény rovnoběžným promítáním, dírkové kamery, která modeluje běžné fotografické objektivy, a snímá obraz středovým promítáním. Dalším modelem, kterému se práce věnuje, kamera modelující širokouhlé sférické objektivy typu rybí oko.

Práce srovnává vlastnosti těchto tří modelů kamery a vliv změny jejich parametrů na promítaný obraz scény. V rámci práce jsou dále uvedeny aplikace, na které je ten který typ kamery vhodný.

V poslední části je popsán program na vykreslování metodou sledování paprsku, který byl v rámci a pro účely práce úspěšně implementován. Byl vytvořen pro demonstraci principů, metod a modelů popsaných v této práci.

Tento program (SewerRT) je k nalezení na přiloženém datovém médiu.

Literatura

- [BADO] Badouel, F.: *An efficient Ray-Polygon intersection*, Graphic Gems, Academic Press, s.: 390 – 393, 1990.
- [LEE] Lee M.: *curiousLee*, osobní webový log, [online 3.1.2008]
http://www.visuallee.com/weblog/2001_09_01_archive.html
- [HALL] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika – 4. část, Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*, Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, ISBN 80-214-1868-0
- [NAVE] Nave C. R.: *HyperPhysics – Inverse Square Law*, Georgia State University, Department of Physics and Astronomy, [online 22.12.2007]
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/isq.html>
- [SEGU] Segural R. J., Feito F. R.: *Algorithms to test ray-triangle intersection – Comparative study*, Universidad de Jaén, Departamento de Informática, 2001
- [RENN] Renner Z.: *The Pinhole Resource*, [online 27.12.2007] <http://www.pinholeresource.com/>
- [ŽÁRA] Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P.: *Moderní počítačová grafika*, 2. vydání, Brno, Computer Press 2004, 609s., ISBN 80-251-0454-0
- [SHIG] Shigang Li: *Full-View Spherical Image Camera*, icpr, pp. 386-390, 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06) Volume 4, 2006
- [JAVA] Sun Microsystems, Java Standard Edition – webové stránky [online 5.4.2008]
<http://java.sun.com/javase/>
- [SEP] Macík Pavel: Promítání kamerou typu „rybí oko“, Brno, 2008, Semestrální projekt, FIT VUT v Brně.

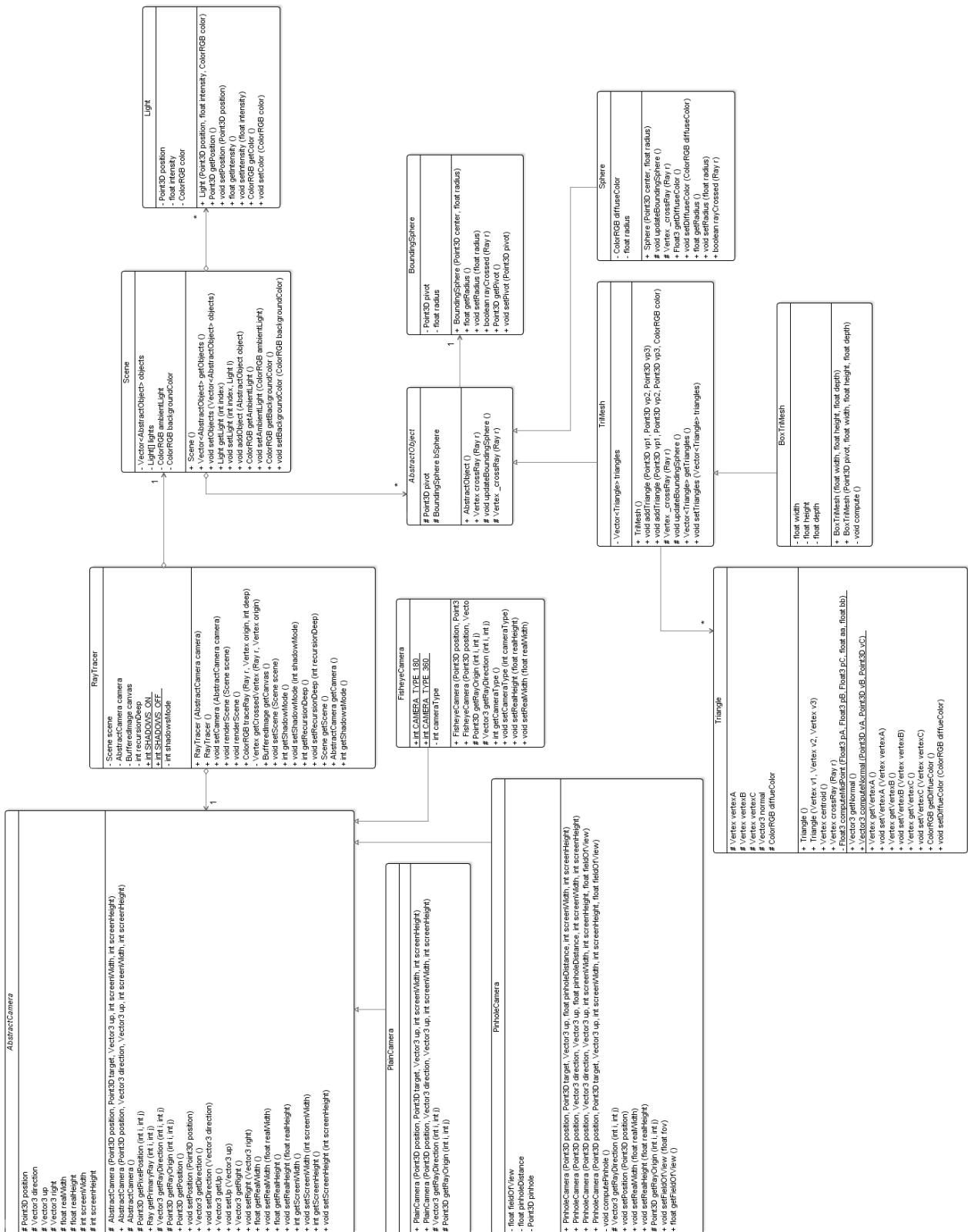
Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Fotografie pořízená pomocí objektivu rybí oko. Převzato z [LEE].....	3
Obrázek 2.1: Tři různé druhy paprsků na rozhraní dvou prostředí.....	5
Obrázek 2.2: Paprsek světla.....	6
Obrázek 3.1: Vektory v trojúhelníku.....	10
Obrázek 3.2: Bod uvnitř trojúhelníku vyjádřený vektorem.....	11
Obrázek 3.3: Vektory (paprsky) Phongova osvětlovacího modelu.....	13
Obrázek 3.4: Pixely obrazu, které jsou reálně vyhodnocovány.....	15
Obrázek 3.5: Sestavení obalové koule nad množinou vrcholů tělesa. Aritmetický průměr - červená, geometrický průměr - zelená.....	17
Obrázek 4.1: Plošná kamera - rovnoběžné promítání.....	19
Obrázek 4.2: Dírková kamera - středové promítání.....	19
Obrázek 4.3: Závislost velikosti zorného úhlu na vzdálenosti štěrbinu.....	20
Obrázek 4.4: Sférická kamera - rybí oko (180°).....	20
Obrázek 4.5: Určení směrového vektoru primárního paprsku příslušného pixelu u sférické kamery..	22
Obrázek 5.1: Konfigurace scény pro srovnání vlastností kamer.....	24
Obrázek 5.2: Vliv změny polohy plošné kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.....	25
Obrázek 5.3: Vliv změny rozměrů průmětny plošné kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, dvakrát větší průmětna.....	26
Obrázek 5.4: Vliv změny polohy dírkové kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.....	26
Obrázek 5.5: Vliv velikosti zorného úhlu dírkové kamery na obraz scény. Zleva: $22,5^\circ$, 45° , 90°	27
Obrázek 5.6: Vliv změny rozměrů průmětny dírkové kamery na obraz scény. Zleva: výchozí, dvakrát větší průmětna.....	28
Obrázek 5.7: Promítnutí scény sférickou kamerou. Zleva: konfigurace scény (modrá kulička představuje sférickou kameru), 180° obraz scény, 360° obraz scény.....	28
Obrázek 5.8: Vliv změny polohy sférické kamery (180°) na obraz scény. Zleva: výchozí, couvnutí, uhnutí vlevo.	29

Seznam příloh

Příloha 1	Diagram hlavních tříd programu SewerRT
Příloha 2	Diagram základních geometrických tříd

Příloha 1 - Diagram hlavních tříd programu SewerRT



Příloha 2 - Diagram základních geometrických tříd

