

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Bakalářská práce

Integrální fotografie a Digitální holografie

Plzeň, 2010

Lukáš Loukota

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 9. května 2010

Lukáš Loukota

Abstract

This work is dedicated to the principles of integral imaging and holography, their comparison, advantages or disadvantages and overall usage. Both of these domains are quite new and modern, though the initial ideas are over hundred years old.

There are shown the fundamentals of the integral imaging, especially from the physical or optical point of view and its intervening and realization in praxis. It is followed by the basics of the ray and radiance propagation through space. This subject is closed with a few words about the cameras capable of such image processing. The second part this work is related to is the holography. Further there are mentioned the most common types of holograms we can encounter, as well as the principles of recording and processing them. Also there are several words dedicated to the areas where holograms can be applied either in common life or in more scientific areas.

The practical part is concerned about digital holography. The main task was to create a digital hologram with the use of SDK Holo Toolkit and proper input data for certain scenes and then to use these outputs, if successful, to reconstruct the computed hologram in reality. There are also described the basic functions of the parts this software consists of.

Obsah

I Popis a seznámení se s principy integrální fotografie a digitální holografie	1
1 Integrální fotografie	1
1.1 Trocha historie	1
1.2 Zobrazení integrální metodou	2
1.2.1 Rekonstrukce obrazu	2
1.2.2 Rozlišení obrazu	4
1.2.3 Světelné paprsky a záření v prostoru	5
1.3 Realizace v praxi	6
2 Holografie	9
2.1 Úvod	9
2.2 Záznam a rekonstrukce hologramu	9
2.3 Vývoj a vznik hologramu	12
2.4 Typy hologramů	13
2.4.1 Transmisní hologram	13
2.4.2 Reflexní hologram (Denisyukův)	14
2.4.3 Duhový hologram	15
2.5 Prohlížení hologramu	15
2.6 Používaná nahrávací média	16
2.7 Digitální holografie	17
II Porovnání vlastností jednotlivých principů	19
3 Integrální metoda	19
4 Holografie	20
4.1 Využití hologramů	20
5 Porovnání	21
III Ověření funkcionality SDK Holo Toolkitu a vygenerování digitálního hologramu pro vybrané scény	23

6	Popis SDK Holo Toolkitu	23
6.1	Formát vstupních dat	23
6.2	Nastavení konfiguračních souborů	23
6.3	Jednotlivé aplikace	24
6.4	Shrnutí	26
7	Vygenerování digitálního hologramu pro vybrané scény	27
IV	Rekonstrukce vypočteného hologramu	29
8	Příprava	29
8.1	Navržení vzorů	29
8.2	Výpočet parametrů scény	30
8.3	Analýza výsledků	31
9	Rekonstrukce hologramu	31
9.1	Specifikace parametrů pro hologram	31
9.2	Výpočet potřebných hodnot	32
9.3	Generování hologramu	32
9.4	Finální rekonstrukce hologramu	34
10	Závěr	35

Část I

Popis a seznámení se s principy integrální fotografie a digitální holografie

1 Integrální fotografie

1.1 Trocha historie

Princip integrálního zobrazování je znám již od brzkého počátku 20. století. V této době francouzský fyzik Gabriel Lippmann (1845-1921), který byl později oceněn Nobelovou cenou v oblasti fyziky, navrhl metodu rekonstrukce trojrozměrného obrazu pomocí sady čoček - spadá tudíž do kategorie prostorového zobrazování. Tento způsob sám nazval „*La Photographie Integrale*“, když jej prezentoval na Francouzské akademii věd. Dle jeho myšlenky, i ta nejdokonalejší fotografie nám nabízí pouze jeden pohled na realitu, zredukovaný na jediný obraz zafixovaný na ploše - obdobně jako u nákresu či malby. Ovšem skutečný pohled nám nabízí nekonečnou rozmanitost, kdy vidíme objekty v prostoru, jejich skutečné velikosti, rozměry a především hloubku. [9]

Jedná se tudíž o ideu starou již přes sto let, ale až nyní se objevily technologie umožňující její realizaci v praxi. Ovšem tato osobnost bude spíše známa svým úspěchem, jenž se týká barevných fotografií a vynálezu kapilárního elektrometru.



Obrázek 1: Gabriel Lippmann

Výzkumu této oblasti se po dobu následujících 40 let věnovalo mnoho odborníků z různých zemí. Ovšem teprve roku 1978 bylo v Tokijském technologickém institutu úspěšně předvedeno vytvoření integrálního 3D zobrazení, za pomoci digitálního prokládání dvourozměrných, počítačem vygenerovaných obrazů.

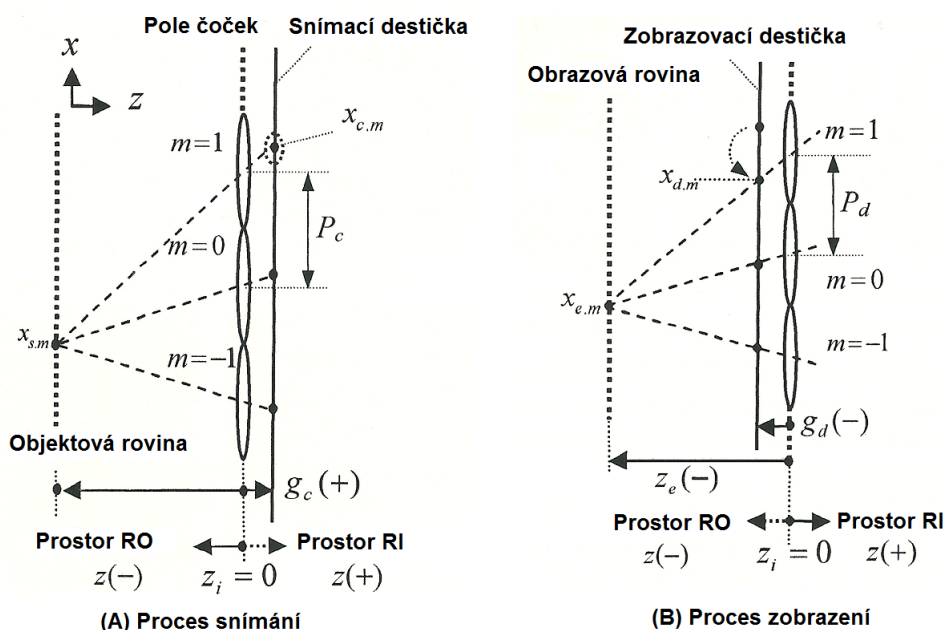
1.2 Zobrazení integrální metodou

Následovalo mnoho pokusů a nových metod, jak vyprodukovat trojrozměrný obraz, především pohyblivé prostorové objekty. Aktivita v této oblasti zůstává vysoká i v současnosti, hlavně v odvětvích týkajících se 3D televize a zobrazovacích displejů.

1.2.1 Rekonstrukce obrazu

Princip základní integrální metody je vyobrazen níže (Obrázek 2). Je možno jej rozdělit na dvě části - snímání a zobrazení. Jednotlivé komponenty jsou pole mnoha konvexních čoček, snímací a zobrazovací destička. Toto pole je použito jak pro snímání, tak i pro pozdější zobrazení objektu a je umístěno bezprostředně před snímací destičkou. Objektová rovina znázorňuje umístění objektu, který je zobrazován. Prostor RO značí prostor reálných objektů a RI reálných obrazů (o nich bude zmínka později).

Při umístění objektu či bodu (pro zjednodušení) před pole čoček dojde k jeho zobrazení skrz každou čočku na snímací destičku. Celkový počet těchto obrázků tedy odpovídá počtu jednotlivých čoček. Poté jsou nasnímaná data obrazu poslána zpět na zobrazovací destičku, která je umístěna ve stejné vzdálenosti jako snímací, ovšem na druhé straně. Po osvětlení nekoherentním světlem, paprsky, které prochází skrz zobrazovací destičku a pole čoček, probíhají po stejných drahách jako paprsky světla při snímání. Ty se nakonec střetávají v místech, kde byl umístěn objekt a formují celistvý finální obraz.



Obrázek 2: Proces snímání a zobrazení

Bližší vysvětlení principu vyžaduje již podrobnější přístup. Obrázek 2(A) ukazuje m -tou čočku, která tvoří spolu s okolními celé pole. Zdroj bodového světla je umístěn na objektové rovině na pozici $(x_{s,m}, z_s)$, kde z_s reprezentuje vzdálenost objektu od pole čoček. Dále hodnoty $x_{i,m}$ a $x_{c,m}$ reprezentují pozici na příslušné destičce s čočkami a na snímací destičce. Dolní index m udává lokální souřadnice, jejichž

počátek se nachází v optické ose každé čočky. Globální pozici lze poté získat přičtením hodnoty mP_c (P_c značí vzdálenost mezi sousedními čočkami) k lokální. Počátek globálních souřadnic je stanoven jako optická osa centrální čočky (pro tu platí $m = 0$). Například $x_{s,m}$ přejde do x_s tímto vztahem:

$$x_s \equiv x_s(m) = x_{s,m} + mP_c \quad (1)$$

Pozice $x_{i,m}$ a $x_{c,m}$ přechází na x_i a x_c stejným způsobem. Souřadnice z nemá dolní index m , protože tato souřadnice jednotlivé čočky se shoduje se souřadnicí celého pole.

Obrázek 2(B) znázorňuje fázi zobrazení. Zde jsou již přítomny koeficienty změny měřítka K_p , K_x a K_g . Ty pocházejí z následujících vztahů a reprezentují změny ve vzdálenosti jednotlivých čoček (K_p), velikosti obrazu (K_x) a mezery mezi polem čoček a zobrazovací deskou (K_g):

$$P_d = K_p P_c \quad (2)$$

$$x_{d,m} = K_x x_{c,m} \quad (3)$$

$$g_d = K_g g_c \quad (4)$$

Předpokládá se, že během snímání a zobrazovací fáze odpovídá střed jednotlivého obrázku optické ose jednotlivé čočky. V následujících vztazích reprezentuje $x_{d,m}$ a $x_{e,m}$ pozici v rámci osy x na zobrazovací destičce a v prostoru, kde probíhá rekonstrukce obrazu. Pro zjednodušení se dále používá jen dvourozměrný vektor (x, z) , i když výpočty a vztahy lze použít i pro trojrozměrné souřadnice. Reálné objekty ve snímání fázi mohou být umístěny i v prostoru, kde je z -ová souřadnice záporná. Toto místo se nazývá prostor reálných objektů (RO). Skutečné obrazy v zobrazovací fázi mohou být lokalizovány v prostoru s kladnou hodnotou z , který se nazývá prostor reálných obrazů (RI).

Konkrétní pozice rekonstruovaného obrazu může být zjištěna pomocí geometrické analýzy. Světelný paprsek vycházející z objektu prochází středem každé čočky a na snímání destičce vytvoří bodový obraz. Pro pozici tohoto bodu platí následující rovnice:

$$x_{c,m} = \frac{g_c}{z_s} x_{s,m} \quad (5)$$

A pro umístění na zobrazovací destičce platí vztah (3). Světelný paprsek z bodového obrazu prochází středem čočky a pokračuje do prostoru, kde bude výsledný obraz. Pro x -ovou pozici paprsku platí následující vztah:

$$x_{e,m} = \frac{z_e}{g_d} x_{d,m} = \frac{z_e}{g_d} K_x x_{c,m} \quad (6)$$

Po konverzi do globálních souřadnic (dosazení vztahů výše):

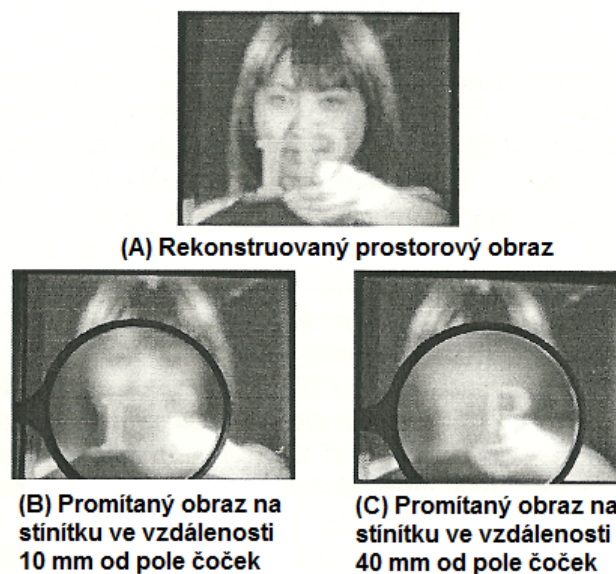
$$x_e = x_{e,m} + mP_d = \frac{K_x z_e}{K_g z_s} x_s + \left(K_p - \frac{K_x z_e}{K_g z_s} \right) mP_c \quad (7)$$

Dále se předpokládá, že pro vzdálenost obrazové roviny platí vztah $z_e = \frac{K_p K_g}{K_x} z_s$. Pokud bychom si vyjádřili $K_p = \frac{K_x z_e}{K_g z_s}$ a dosadili do rovnice (7) výše, dojde k úplnému

vyrušení druhé části vzorce a pro globální souřadnice bude platit jen: $x_e = K_p x_s$. Výpočet globálních souřadnic je nezávislý na počtu jednotlivých čoček. Všechny světelné paprsky z bodového obrazu procházejí skrz čočky a protínají se v jednom místě prostoru, ve kterém dochází k rekonstrukci obrazu. Jeho pozice je dána vztahem (8), kde x_s a z_s jsou souřadnice původního objektu. Jak je patrné, pozice obrazu je upravena oproti výchozí jen v závislosti na zvětšujících koeficientech.

$$(x_e, z_e) = \left(K_p x_s, \frac{K_p K_g}{K_x} z_s \right) \quad (8)$$

Ve speciálním případě, kdy $K_g = K_x = -1$ a $K_p = 1$, je rekonstruovaný obraz umístěn přesně v téže pozici jako původní objekt. Rovnice (8) ukazuje, že vytvořený obraz může být umístěn na vcelku libovolné pozici, s přihlédnutím k umístění zdroje bodového světla ve snímání fázi.



Obrázek 3: Zobrazení objektů

Na obrázku 3(A) lze vidět vytvořený prostorový obraz. Průměr jedné čočky, ze kterých je tvořeno celé pole, je 1 mm a počet takových čoček je celkem 13000 (100 svisle a 130 vodorovně). Jednotlivé obrazy objektu jsou zachyceny kamerou o velmi vysokém rozlišení. Ostatní dva obrázky 3(B) a 3(C) ukazují dvě zobrazení, promítané na stínítko před polem čoček, aby bylo patrné prostorové zobrazení objektů. Stínítko je umístěno jednou 10 mm a podruhé 40 mm od pole. Na Obrázku 3(B) je zřetelné písmeno I a na dalším 3(C) je to zase písmeno P. Z těchto ukázek je patrné, že zobrazování pomocí integrální metody dokáže vytvořit obrázky s určitou hloubkou. [10]

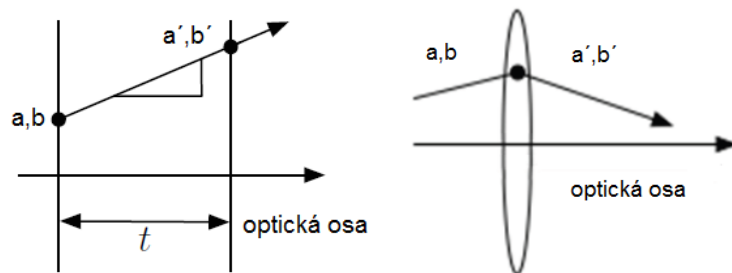
1.2.2 Rozlišení obrazu

Mezi hlavní faktory, které mají vliv na rozlišení je vzdálenost jednotlivých čoček, z nichž je tvořeno celé pole. Dále má vliv difrakce světla procházejícího skrz zmíněné pole a také i vzdálenost pixelů základních obrazů, ze kterých se skládá zrekonstruovaný finální obraz.

Vizuální rozlišení 3D obrazu při splnění vzorkovací podmínky není omezeno Nyquistovou frekvencí - jedná se o frekvenci, která je poloviční oproti vzorkovací frekvenci diskrétního signálu. Místo toho je zvýšeno k hornímu limitu frekvence díky difrakci paprsků. Pokud by byl obraz umístěn v prostoru dosahu čočky (přílehlé okolí pole čoček), bude rozlišení Nyquistovou frekvencí omezeno. Ve výsledku bylo výše ukázáno, že vzorkování pomocí pole čoček má markantní význam, pokud je objekt umístěn v přílehlém okolí pole čoček a rozlišení je omezeno vzdáleností jednotlivých čoček. K výraznému snížení rozlišení ovšem dojde, pokud je obraz mimo tento prostor, jelikož nedostačuje vzdálenost pixelů. [10]

1.2.3 Světelné paprsky a záření v prostoru

Prostor, ve kterém se paprsky pohybují, se nazývá fázový. Jedná se o čtyřrozměrný vektorový prostor s nulovým vektorem reprezentujícím optickou osu. Každý paprsek v tomto prostoru je vektor o čtyřech rozměrech. Jakýkoliv optický přístroj je jakási matice, která dokáže příchozí paprsek patřičně transformovat na vystupující. Podle Gaussovy myšlenky lze matici jakékoliv optické transformace získat pomocí operací translace a lom. První popisuje šíření paprsku prostorem a druhá lom paprsku na optické čočce. Pro lepší představu viz Obrázek 4, kde a, b jsou souřadnice výchozí pozice paprsku a a', b' reprezentují koncovou pozici.



Obrázek 4: Translace a refrakce paprsku

Jedná-li se o translaci, paprsek při tom urazí vzdálenost t . Tento vztah lze zapsat rovnicí (9) níže, kde matice T značí translační matici transformace.

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (9)$$

Druhou nezbytnou transformací je lom čočky, kdy přicházející paprsek pod určitým úhlem je vychýlen po průchodu čočkou (veličina f reprezentuje ohniskovou vzdálenost čočky). Přičemž platí, že čím dál je paprsek od středu čočky, tím větší lom nastane. Tento jev lze popsat vztahem (10) níže.

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (10)$$

Prochází-li tedy paprsek skrz 3 čočky, výsledný vztah bude mít podobu: $A = T_4 L_3 T_3 L_2 T_2 L_1 T_1$. Pro běžný fotografický aparát s jedinou čočkou platí tedy vztah: $A = T_2 L_1 T_1$. V maticovém zápisu pak:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{b}{f} & ab \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{f} \right) \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{a}{f} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Zajímavé je, že determinantem matice získané ve vztahu (11) je číslo 1. Zaostření poté nastává (v matematickém jazyce) tehdy, když platí: $ab \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{f} \right) = 0$, čehož dosáhneme podmínkou $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{f} = 0$. Dosadíme-li tuto podmínku ($\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$) do výsledné matice (11) a upravíme, získáme novou matici (12), jejíž determinant je rovněž 1.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{b}{f} & 0 \\ -\frac{1}{f} & -\frac{a}{b} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Tento vztah má za důsledek to, že pokud scénu snímanou tradičním fotoaparátlem (vybaveným jednou čočkou) umístíme do vzdálenosti f , získáme matici $A = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$, jejíž determinant je opět 1. Lze vyvodit poměrně významnou fyzikální vlastnost - každý optický systém, který lze reprezentovat výše zmíněnými transformacemi, má determinant roven 1. Odůvodnění je prosté - každá elementární transformace má tentýž determinant a při jejich kompozici dochází pouze k pronásobení navzájem. Přičemž geometrický význam determinantu (v našem případě matice 2 x 2) je takový, že v absolutní hodnotě reprezentuje obsah rovnoběžníku tvořený prvky matice. Z toho plyne, že tyto transformace zachovávají resp. nemění obsah (zmíněného rovnoběžníku) - nastává jen zkosení (shearing).

Co se týče záření (zde lze označit i jako vlnění), je možné jej definovat jako energetickou hustotu v čtyřrozměrném prostoru paprsků. Výše jsme si ukázali, že platí zachování obsahu (pro více rozměrů se poté jedná o objem), zákon zachování energie je rovněž každému znám. Vzhledem k tomu, že záření lze spočítat právě jako podíl energie na jednotku objemu, je rovněž zachováváno.

Optické prvky ovšem netransformují jen paprsky, ale i vlnění. Nechtě body v prostoru paprsků $x = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ mají záření $r(x)$ před transformací skrz optický element A a $r'(x)$ po ní. Tudíž lze napsat vztah $x' = Ax$. Díky zachování záření platí vztah (13) níže.

$$r'(x') = r(x) = r(A^{-1}x') \quad (13)$$

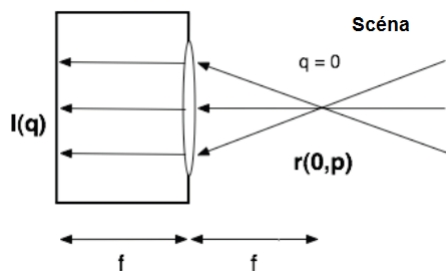
Jelikož se zde používá inverzní matice, je nutno tuto úpravu uplatnit i na transformační matice, které jsou zmíněny výše (viz následný vztah). [9]

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} L^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

1.3 Realizace v praxi

Znalost chování paprsků a vlnění nám umožní udělat si představu o tom, jak probíhá vznik obrázku. Ten je při obvyklém postupu vytvořen spojením (integrováním)

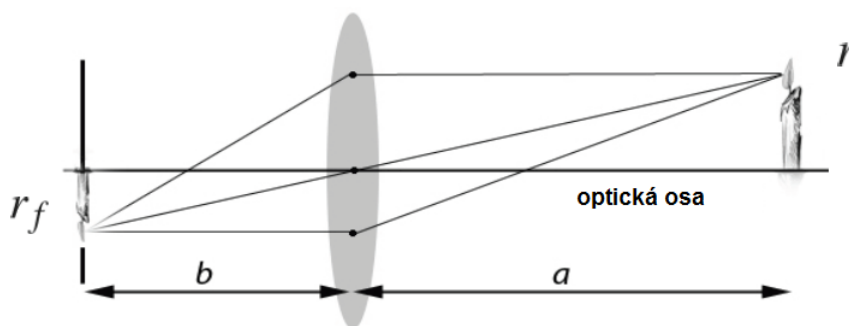
paprsků ze všech směrů do každého pixelu, což lze zapsat jako $I(q) = \int_p r(p, q) dp$. Ovšem abychom byli schopni zachytit i vlnění, je nutné zachytit paprsky z různých směrů jednotlivě a ty musí být namapovány na různé pixely. Při použití tzv. 2F kamery (viz Obrázek 5 níže) získáme obraz který je převrácený úhlově i pozičně. Jedná se o fotoaparát, jenž má senzor umístěn ve vzdálenosti stejné jako je ohnisková vzdálenost čočky (f). Dochází k zachycení úhlového rozdělení záření, za předpokladu že se s měnícím se q nemění příliš prudce (jsme blízko $q = 0$).



Obrázek 5: 2F kamera

Transformace, které se zde uplatňují jsou opět lom a translace, jelikož se optická soustava skládá z prostoru, čočky a prostoru. Toto lze zapsat jako vztah $A = T_f L_f T_f = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$, přičemž zvolíme-li průměr kamery D , pro výsledný obraz bude platit $I(q) = \frac{D}{f} r(0, \frac{q}{f})$.

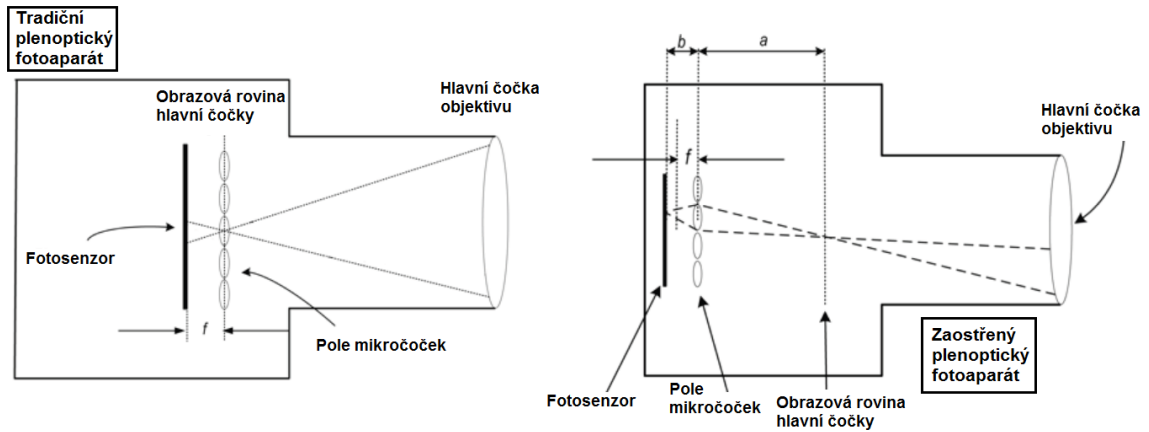
Pro klasický 2D fotoaparát zůstává transformace stejná, opět paprsky procházejí skrz prostor, čočku a prostor (Obrázek 6). Ovšem zde již objekt ani senzor nejsou umístěny ve stejné ohniskové vzdálenosti použité čočky, ale obecně ve vzdálenostech a (pro objekt) a b (pro senzor). Transformační matice nyní bude vypadat $A = T_f L_f T_f = \begin{bmatrix} -\frac{b}{f} & 0 \\ -\frac{a}{f} & -\frac{a}{b} \end{bmatrix}$ a pro obraz bude platit $I(q) = \frac{D}{b} r(-\frac{a}{b}q, 0)$.



Obrázek 6: Tradiční 2D fotoaparát

Co se týče zachycení vlnění, vztahy napsané výše u 2F kamery platí pouze pro q blízka 0. Pro získání veškerého vlnění, je nutné zachytit úhlové rozdělení pro všechna q . S touto myšlenkou přišel již zmiňovaný G. Lippmann. Lippmannova kamera je založena na principu 2F kamery, jen je zde tato metoda rozšířena pro více q a používá se tudíž prostorové multiplexování.

Jedním z typů fotoaparátů, které umožňují pořizovat prostorové snímky, je plenoptický fotoaparát (viz Obrázek 8, nalevo běžný (verze 1.0), napravo zaostřený (verze 2.0)). U levého modelu kamery jsou mikročočky umístěny tak, že jsou zcela rozostřeny vůči obrazu hlavní čočky, čili zaostřeny na nekonečno. Na rozdíl od pravého, kde jsou zaostřeny přesně na obraz vytvořený hlavní čočkou a tudíž vyhovují rovnici zobrazení čočkou.



Obrázek 7: Plenoptický fotoaparát

Běžný model oproti zaostřenému ovšem poskytuje poměrně rozmazané obrazy, jak již lze z názvu usuzovat. Zaostřený vytvoří již ostré převrácené obrazy. Stejně tak jím lze získat obraz s mnohem vyšším rozlišením, opět z důvodu zaostření. U této verze lze dosáhnout až hodnoty $\frac{b}{a}$ rozlišení senzoru, kde a a b jsou vzdálenosti rovin (viz Obrázek 7 výše), což je až plné rozlišení senzoru. [9]

Aby bylo možné podobné aparáty konstruovat a zlepšovat, je nutné porozumět používaným operacím a dané problematice. V předchozí sekci je jen lehce poukázáno na stávající pokrok či problémy této oblasti.

2 Holografie

2.1 Úvod

Termín holografie vznikl sloučením řeckých slov „holos“ (úplný) a „grafie“ (záznam). Jedná se o poměrně vyspělou formu záznamu obrazu - hologramu. Výhodou je, že dokáže zachytit i jeho trojrozměrnou strukturu a může být použita i k uchovávání, čtení či jinému zpracování informace (v podobě binárních dat).

Teoretické základy holografie položil v roce 1948 maďarsko-britský fyzik Dennis Gabor (Dénes Gábor) (1900-1979), který byl rovněž oceněn Nobelovou cenou za fyziku v roce 1971. Ovšem většího rozkvětu se holografie dočkala až po vynalezení laseru v roce 1960, protože právě laser dodal dostatečné koherentní světlo (o jediné frekvenci, fázi a směru šíření kmitů). O čtyři roky později se podařilo vědcům v USA (Emmett Leith a Juris Upatnieks) a rovněž i v Sovětském svazu (Yuri Denisyuk) zobrazit první trojrozměrný záznam.

Holografie umožňuje zaznamenat světlo rozptýlené objektem a později ho zrekonstruovat tak, že výsledný obraz se nachází na stejném místě vůči nahrávacímu médiu. Obraz se mění na základě změny pozice a orientace pozorovatele a vytváří tak prostorovost. Dochází tak vlastně k zaznamenání trojrozměrného předmětu, ale na dvojrozměrný obrazový nosič. Narozdíl od principu vzniku fotografie, kdy se zachycuje intenzita jednotlivých paprsků světla v každém bodě, holografie uchovává informaci o intenzitě rovněž, ale navíc i o fázi světla odraženého od předmětu. V nedávné minulosti tento obor vytěžil z velkého rozšíření polovodičových laserů, které lze najít dnes běžně v každé DVD mechanice.

Digitální holografie by se dala zařadit jako pododvětví běžné holografie, proto se tato práce věnuje jen a pouze jí. Principy a jevy, které nastávají při nahrávání, prohlížení či jiných činnostech spojených s hologramem, se uplatňují i v digitální holografii. Ovšem mají jinou formu, využívá se více technika, ať již v podobě nahrávacích zařízení anebo počítačového zpracování dat a simulací. Tudíž aby bylo možno takovou simulaci vytvořit popř. s ní dále pracovat, je nutné pochopit, jak vše funguje v původní fotochemické verzi.

Ovšem nezřídka dochází k záměně významů mezi digitální holografii a hologramy generovanými počítačem (dále jen CGH, z anglického názvu computer-generated holograms). Svět v tomto označení není zcela sjednocen a pod pojmem digitální holografie se velmi často nechá dohledat právě proces numerické rekonstrukce a výpočtu hologramu, který po vytištění může být prosvícen laserem (takto je to také chápáno v této práci). Ale někteří tento obor přisuzují právě k CGH a k digitální holografii řadí opačný proces, kdy je hologram generován opticky za použití laseru, který svítí na objekt, přičemž hologram je nahráván elektronicky pomocí patřičného senzoru (např. CCD). Oba tyto přístupy mají ale společnou část, kterou je poté numerická kalkulace výsledků. [2, 4]

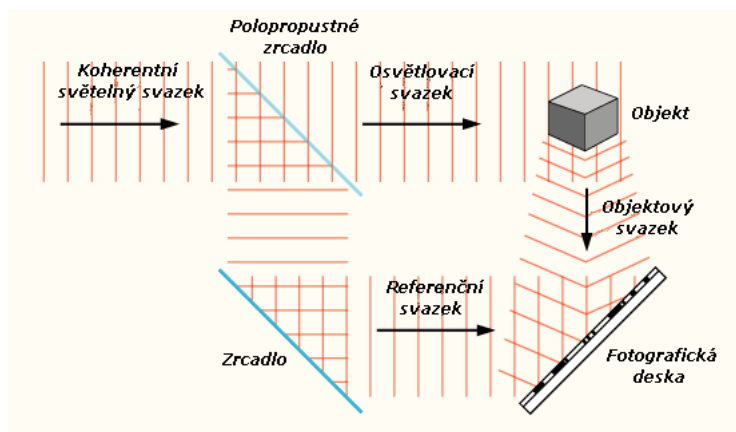
2.2 Záznam a rekonstrukce hologramu

Svazek koherentních paprsků, který je vyzářen z laseru, musí být dostatečně široký, aby mohl zaznamenat úplně celý předmět. Ten se pomocí optických prostředků jako

je např. polopropustné zrcadlo rozdělí na dvě části - osvětlovací a referenční svazek. Po dopadu a následném odrazu osvětlovacího svazku od snímaného předmětu vzniká objektový svazek. Ten již nese informaci nejen o intenzitě, ale i o fázi. Právě fáze vypovídá o trojrozměrné struktuře snímaného objektu. Díky interferenci referenčního a objektového svazku v místě obrazového nosiče (např. fotografický film nebo jiné podobné médium) dojde k zaznamenání informací o intenzitě a fázi. Takto vznikne interferenční obrazec - hologram, kde jsou nepravidelně zapsána rozmístěná interferenční maxima. Jednoduché schéma průběhu je znázorněno níže, viz Obrázek 8.

Celkový princip jak záznam probíhá lze vysvětlit zjednodušeně pomocí jevu difrakce vlnění. U paprsku světla, který prochází difrakční mřížkou dojde k ohnutí o úhel α . Mezi tímto úhlem, vlnovou délkou světla λ a vzdáleností dvou šěrbin difrakční mřížky d platí vztah (14):

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} \quad (14)$$



Obrázek 8: Záznam hologramu

Velmi jednoduchý hologram lze získat překrytím dvou rovinných vln, které vychází ze stejného světelného zdroje. Jedna dopadne na fotografický nosič bez jakékoliv změny a druhá vlna (objektová) pod úhlem α . Relativní fáze f těchto paprsků se mění na fotografické desce dle vztahu:

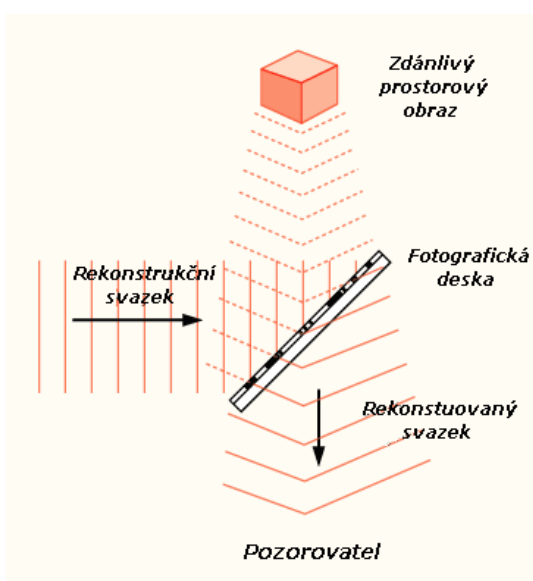
$$f = 2\pi y \frac{\sin \alpha}{\lambda} \quad (15)$$

kde y je vzdálenost (resp. místo dopadu) na destičce. Dochází k interferenci mezi těmito dvěma paprsky a vytvoření interferenčního vzoru. Fáze se mění o 2π na intervalech $d = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$, tudíž rozestup interferenčních vln je závislý na d . Takto jsou tedy relativní fáze objektového a referenčního paprsku zakódovány jako minimum a maximum tohoto vzoru. Při vývoji hologramu jako difrakční mřížka slouží právě tento vzor. Když dopadne referenční paprsek na fotografickou destičku, je zčásti ohnut právě pod úhlem α , který je stejný jako úhel dopadu objektového paprsku. Tento úhel závisí na rozestupu vzorku na destičce. Difrakční mřížka vytvořená interferencí výše zmíněných vln takto vlastně zrekonstruovala objektový paprsek a vznikl tím samotný hologram.

Aby byl obraz hologramu zrekonstruován správně, je nutné jej osvítit rekonstrukčním (opět koherentním) svazkem paprsků. Ten je vyzařován z laseru obvykle pod stejným úhlem (není to ale pravidlem), pod jakým dopadal na předmět referenční svazek paprsků při snímání.

Díky difrakci rekonstrukčního svazku se vytvoří světelné pole, které odpovídá trojrozměrnému obrazu předmětu, který je zaznamenán v hologramu. Zkrátka hologramem projdou jen paprsky, odpovídající odraženým paprskům od zaznamenaného předmětu. Rekonstrukce je hrubě znázorněna níže, Obrázek 9.

Hologram se vlastně chová jako konkávní čočka, jelikož způsobuje změnu vlnoplochy z rovinné na divergentní. Rovněž zvýší divergenci každé vlny, která by na něj dopadla, stejně jako tomu je u běžné čočky. Jeho ohnisková vzdálenost je rozdíl vzdáleností zdroje a fotografické destičky.



Obrázek 9: Rekonstrukce hologramu

Aby se nahrál hologram složitějšího objektu, je nejprve laserový paprsek rozdělen na dva (např. za použití polopropustného zrcadla). Jeden paprsek osvítí objekt a odrazí se na fotografickou destičku, která paprsek rozptýlí. Druhý paprsek osvítí destičku přímo. Podle difrakční teorie, každý bod osvětleného objektu vystupuje jako samotný zdroj záření. Každý z nich poté interferuje s referenčním paprskem a vzniká tak interferenční vzor. Když je pak objekt odstraněn a dojde k osvětlení referenčním paprskem, každý bod vytvořené difrakční mřížky rozptýlí část paprsků tak, že rekonstruuje vlnoplochu ze svého bodového zdroje. Každá tato jednotlivá vlnoplocha se sečte s ostatními a vytvoří se takto celý objektový paprsek. Pozorovatel poté vnímá tento vytvořený soubor vlnoploch stejně jako tomu bylo u osvětleného objektu. Zjednodušeně řečeno se objekt jeví, že je stále na stejném místě, i když se vlastně jedná už o obraz. Ten se nazývá virtuální, jelikož vyobrazuje objekt, i když tam už není. Na takovémto principu je založen transmisní hologram.

Matematický model - Světelnou vlnu lze popsat komplexním číslem z . Amplituda (maximální hodnota periodické veličiny) a fáze světla je získána z absolutní hodnoty komplexního čísla a úhlu, který svírá s tou částí osy, na níž se vynáší reálné hodnoty (při grafickém znázornění). Objektové a referenční vlny v kterémkoliv bodu holografického systému jsou dány čísla z_o a z_r . Kombinovaný paprsek je poté dán součtem $z_o + z_r$. Energie takto kombinovaných paprsků je úměrná druhé mocnině amplitudy vlny:

$$|z_o + z_r|^2 = z_o \bar{z}_r + z_o^2 + z_r^2 + \bar{z}_o z_r \quad (16)$$

Použité označení \bar{z} znamená komplexně sdružené číslo, pro které platí vztah $z_r \bar{z}_r = 1$. Je-li fotografická deska vystavena oběma paprskům a poté vyvolána, její propustnost T je úměrná energii světla, která na destičku dopadla a platí pro ni vztah:

$$T = k (z_o \bar{z}_r + z_o^2 + z_r^2 + \bar{z}_o z_r) = k |z_o + z_r|^2 \quad (17)$$

kde k je konstanta. Je-li vyvolaný hologram ozářen referenčním paprskem, světlo přenesené skrz destičku z_h je:

$$z_h = T z_r = k (z_o \bar{z}_r + z_o^2 + z_r^2 + \bar{z}_o z_r) z_r = k (z_o + |z_o|^2 z_r + |z_r|^2 z_r + \bar{z}_o z_r^2) \quad (18)$$

Z tohoto vzorce je patrné, že z_h závisí na čtyřech veličinách. První je $k z_o$, což je rekonstruovaný objektový paprsek. Druhá a třetí veličina reprezentují referenční paprsek, jejichž amplituda byla upravena přenásobením hodnotami z_o^2 a z_r^2 . Tato úprava způsobí difrakci paprsku kolem centrálního směru. Čtvrtá veličina se označuje jako konjugovaný objektový paprsek. Ten vytváří reálný obraz objektu v prostoru za holografickou deskou. [2, 4]

2.3 Vývoj a vznik hologramu

Při nahrávání hologramu musí být zajištěno, že objektový a referenční paprsek vytvoří interferenční vzor stabilní po celou dobu průběhu. To nastane, pokud mají oba paprsky stejnou frekvenci a fázi - jsou tedy vzájemně koherentní. Této podmínce vyhovují nejvíce lasery, které se ostatně používají již od samých začátků holografie. Ačkoliv D. Gabor, zakladatel holografie, používal kvazichromatické světelné zdroje (o téměř totožné vlnové délce). V principu lze použít dva různé paprsky, pokud je podmínka koherence splněna, v reálu je ale vždy lepší a jistější používat jeden laser.

Navíc médium musí být schopné pojmout na emulzní vrstvu interferenční obrazce. Jejich jemnost závisí na úhlu mezi referenčním a objektovým paprskem. Pokud by byl úhel 45° a vlnová délka $0.5 \mu\text{m}$, rozestup bude kolem $0.7 \mu\text{m}$. Nahrávací kapacita se sníží, pokud se nenatisknou všechny interferenční vzory, což se projeví opět snížením rozlišení přímo úměrně úbytku kapacity.

Rovněž je velmi důležitá mechanická stabilita celé scény. Jakákoliv změna ve fázi referenčního a objektového paprsku, zapříčiněná vibracemi nebo prouděním vzduchu, by způsobila posun v interferenčním vzoru na destičce. Pokud by došlo k změně fáze o více než π (znamená to, že jeden paprsek má přesně opačnou fázi než druhý), dojde k vyrušení obou a nenahrají se žádná data. Nahrávací čas se pohybuje v řádech

několika sekund až minut a vzhledem k tomu, že změna fáze o π odpovídá posunu vlnové délky o $\frac{\lambda}{2}$, jedná se o poměrně klíčový faktor. Čím kratší čas, tím je menší riziko, že se něco podobného přihodí.

Maximální hloubka scény, kterou lze holograficky nahrát, závisí na vzdálenosti šíření světla od zdroje k bodu, kde dojde ke snížení interference a porušení koherence. Dobrý laser má obvykle tuto vzdálenost v řádu několika metrů, což dostačuje na hluboký hologram. Malé hologramy lze vytvořit za použití laserových per či ukazovátek - zde je ale velikost omezena předně díky malému výkonu takovýchto laserů (ne více než 5 mW).

Nahrávaný objekt by měl mít nerovný povrch, aby bylo světlo rozptýleno pod širokou škálou úhlů. Lesklý povrch odráží paprsky jen pod jedním úhlem v každém bodu povrchu, tudíž většina paprsků nedopadne na nahrávací médium. Za zmínku stojí, že matné a nerovné povrchy těles vytvoří na emulzi destičky skvrnitý vzor, což vypovídá o odlišné amplitudě a fázi.[1, 2]

2.4 Typy hologramů

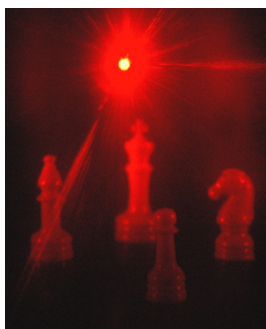
Existuje několik druhů hologramu, lišících se metodou vzniku. Hlavní typy jsou dva, a to transmisní hologramy a reflexní. Poté existuje poměrně značné množství typů, které jsou modifikacemi těchto dvou a vycházejí z jejich principu. Následující odstavce jsou věnovány pouze těm základním druhům.

2.4.1 Transmisní hologram

Tento typ hologramu byl vyroben prvně vědci Emmettem Leithem a Jurisem Upatniakem na michiganské univerzitě v USA. Je možno si jej prohlédnout při nasvícení laserem, ale musí být stejného typu jako byl laser použitý při nahrávání (resp. se musí jednat o paprsky stejných vlastností). Pozorovatel se musí dívat ze strany odlehle té, na níž jsou nahraná data a najít správný úhel pod kterým má laser dopadat (opět aspoň přibližně stejný jako při nahrávání). Porušení jakékoliv z podmínek výše má za následek deformaci obrazu. Rekonstruovaný obraz může být zvětšen, pokud dojde k osvětlení světlem o větší vlnové délce.

Interferenční obrazec (Obrázek 13 v kapitole 2.5), který se tvoří při nahrávání tohoto hologramu, vzniká zde za pomoci dvou paprsků. Scéna musí být v klidu, jakýkoliv pohyb resp. změna ve fázi paprsků vede k posunu obrazce a snížení výsledné kvality. Virtuální obraz může být velmi ostrý - např. relativně malý hologram dokáže zrekonstruovat obraz pokoje standartní velikosti se všemi lidmi a předměty, jako bychom se při tom dívali oknem. Kdybychom jej rozbili na malé kousky, popřípadě zakryli celou část papírem s otvory, každým otvorem (či na každé části) bychom stále viděli celou scénu, pokaždé však pod jiným úhlem. Pokud by laserový paprsek směřoval opačně (vzato vůči směru referenčního paprsku) skrz hologram, na stínítku umístěném na pozici původního nahraného předmětu by se vytvořil reálný obraz.

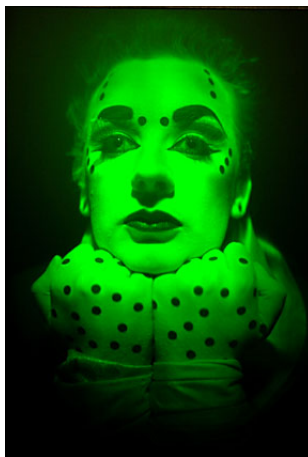
Následným vylepšením takového hologramu se získá transmisní duhový hologram, který umožňuje snadnější způsob osvětlení. Stačí bílé světlo nebo jiný zdroj monochromatického světla. Dnes se lze s touto technologií setkat například jako bezpečnostní prvek kreditních karet, bankovek a jiných produktů. [2, 6, 8]



Obrázek 10: Transmisní hologram

2.4.2 Reflexní hologram (Denisyukův)

Jedná se o typ hologramu, kdy zrekonstruovaný obraz lze vidět pod bílým (běžným) světlem. Zdroj tohoto světla ale musí být umístěn na straně pozorovatele, v patřičné vzdálenosti a pod správným úhlem. Tento typ hologramu je nejčastěji k vidění v různých galeriích nebo muzeích. Opticky jsou zrekonstruované obrazy objektů identické s předlohami a dnes je již možné zvolit téměř jakoukoliv barvu zobrazení. Pokud se navíc jedná ještě o tlustý hologram (někdy označováno jako objemový), může dojít k difrakci až 100% odraženého světla, což způsobí velmi účinnou rekonstrukci obrazu. Tlustým hologramem se označují takové, u nichž je tloušťka nahrávacího materiálu větší, než je vlnová délka používaného světla. Navíc u reflexního hologramu je zrekonstruovaný obraz téměř nerozpoznatelný od předlohy, obraz diamantu se bude blýskat, obraz zrcadla bude odrážet bílé světlo.



Obrázek 11: Reflexní hologram

Rozdíl mezi tímto typem a transmisním hologramem je v použitém zdroji světla, dále ve směru nasvícení objektu při nahrávání a posléze hologramu při prohlížení. Při pořizování je objekt umístěn na druhé straně fotografické destičky, než která je nasvécována. Transmisní hologram se nasvécuje zezadu laserem (a prochází skrz), reflexní zřepředu bílým světlem. Navíc změna v tloušťce hologramu způsobuje odlišné zbarvení zrekonstruovaného obrazu (to je způsobeno změnou rozestupu interferenčních vzorů), oproti transmisním typům. U nich dochází mimo změny rozestupu navíc i k rotaci vzorů. [2, 6]

2.4.3 Duhový hologram

Jedná se o speciální typ transmisního hologramu, který rekonstruuje jasný a ostrý obraz při osvětlení bílým světlem. Samotný vznik je možno rozdělit na dvě fáze. První je pořízení již známého transmisního hologramu klasickým způsobem.



Obrázek 12: Duhový hologram

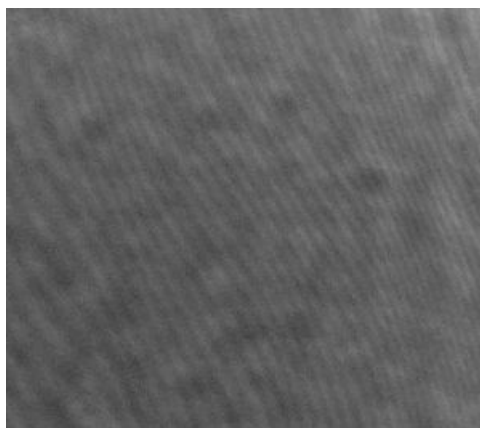
Když je poté osvětlen originální referenční vlnou, dojde k rekonstrukci reálného obrazu původního objektu. Poté se do scény mezi destičku a obraz umístí stínítko s horizontální štěrbinou, skrz kterou dojde k nahrání nového hologramu (jako předloha slouží právě obraz prvního hologramu).

Získaný obraz je pro pozorovatele viditelný, pokud si při prohlížení najde vhodnou pozici, reprezentující umístění stínítka během nahrávání. Navíc je obraz velmi ostrý a jasný. Při pohybu hlavou do stran je možné pozorovat poměrně širokou horizontální paralaxu. Ovšem při pohybu hlavou nahoru či dolů obraz zmizí, jelikož vertikální paralaxa je eliminována. Nasvícení může být pomocí referenčních paprsků, kterými byl hologram vytvářen. Při osvětlení klasickým bílým světlem dojde k rozložení obrazu na vertikální ploše za vytvoření spojitého spektra. Pro pozorovatele stačí, aby se očima dostal do jakéhokoliv místa tohoto spektra. Poté lze spatřit trojrozměrný ostrý obraz v korespondující barvě. [2]

2.5 Prohlížení hologramu

Obrázek 13 zachycuje hologram, nahraný na fotografické emulzi. Velikost vyobrazené části je 8×8 mm. Samotný holografický záznam se skládá ze skvrn o různé světelné propustnosti. Ty se zde vyskytují díky interferenci vícenásobných odrazů od skleněné destičky, na které je fotografická emulze. Z takového záznamu rozeznat objekt pouhým okem není o nic jednodušší, než rozeznat například hudbu při pohledu na datovou oblast CD disku. Je-li takový hologram osvětlen divergentním laserovým paprskem, pozorovatel pak může vidět objekt, který byl předlohou. Dochází totiž k difrakci světla hologramem a následné rekonstrukci paprsků původně odražených od nahrávaného objektu.

Při pohledu na scénu každé oko pozorovatele zachytí část světelných paprsků, které z ní vycházejí. Obraz je poté zformován pomocí čočky v oku na sítnici, kde paprsek každé pozice je zaměřen na specifickou pozici roviny, na níž je obraz promítán. Protože hologram rekonstruuje celé rozptýlené světelné pole, které na něj dopadlo, pozorovatel vidí stejný objekt, ať již se jedná o světelné pole ovlivněné objektem



Obrázek 13: Fotografická emulze

anebo zrekonstruované pole hologramem. Není schopen říct, zda se dívá na skutečný nebo virtuální objekt. Při pohybu pozorovatele se bude rovněž měnit úhel, pod kterým je objekt vidět, jako by tomu bylo při pozorování reálného předmětu. Pozorování scény, na níž je přítomno více objektů, vykazuje paralaxu. To znamená, že se mění zdánlivá poloha bodu resp. předmětu vzhledem k pozadí při pozorování ze dvou různých míst. Pokud se pozorovatel dívá oběma očima, získá prostorový vjem holografického obrazu stejně jako v případě pozorování samotného předmětu.

Hologram jako takový není fotka, ale kódovaný systém, který umožní rekonstrukci světelného pole. Protože každý bod hologramu obsahuje světelnou informaci celé nahrávané scény, je možné ji zobrazit za pomoci jakkoliv malé části hologramu. Pokud bychom přirovnali holografickou destičku k oknu, poté kousek této destičky je část okna, kterou lze hologram pozorovat, i když je zbytek okna zakrytý. Samozřejmě zobrazení objektu z části hologramu není úplně totožné jako z celého. Liší se především v rozlišení, což se projeví nižší ostroستí a celkové kvalitě vytvořeného obrazu. [4]

2.6 Používaná nahrávací média

Vhodné nahrávací médium musí být schopno do emulze zaznamenat interferenční vzor jak bylo řečeno výše. Dále ale také musí být dost citlivé, aby toho bylo dosaženo za relativně krátký časový úsek, během kterého je celý optický systém stabilní. Což znamená, že jakýkoliv posun ve vlnové délce paprsků musí být menší než $\frac{\lambda}{2}$. Nahrávací destička musí změnit interferenční vzor na optický element, který modifikuje buďto amplitudu nebo fázi světla, které na ni dopadají. Dle této vlastnosti existují 2 typy hologramů - fázové a amplitudové. Fázové se ale používají častěji, jelikož amplitudové mají nižší účinnost. Následující tabulka uvádí jedny z nejčastěji používaných materiálů a vlastnosti hologramů z nich vyrobených.

Pro typy hologramu jsou použity zkratky A (amplitudový) a F (fázový). Účinností se rozumí maximální možná. Vystavení znamená doba expozice, v jednotkách $[mJ/cm^2]$ a rozlišení $[mm^{-1}]$. [2, 4]

Materiál	Použití	Typ	Účinnost	Vystavení	Rozlišení
fotografická emulze	1x	A	6%	0,001 - 0,1	$10^3 - 10^4$
fotografická emulze	1x	F	60%	0,001 - 0,1	$10^3 - 10^4$
dichromovaná želatina	1x	F	100%	10	10000
fotorezist	1x	F	33%	10	3000
fototermoplast	více	F	33%	0,01	500 - 1200
fotopolymer	1x	F	100%	1 - 1000	2000 - 5000
fotochromní materiál	více	A	2%	10 - 100	> 5000
fotorefraktivní materiál	více	F	100%	0,1 - 50000	2000 - 10^4

Tabulka 1: Základní vlastnosti materiálů

2.7 Digitální holografie

Digitální holografie se zabývá hologramy, které již nejsou optické, nýbrž jsou v určité formě produkovány za použití počítače. Z jednoho úhlu pohledu se jedná o technologii, která umožňuje zpracovávat holografická data, nejčastěji pomocí CCD kamery nebo podobného zařízení. Konkrétně to znamená získání číselných údajů z nahrávaných dat objektu, narozdíl od optické rekonstrukce, která představuje vzhled objektu. Obvykle je digitální hologram reprezentován trojrozměrným povrchem anebo opticky nahuštěnými daty. Zjednodušeně řečeno, za použití tohoto přístupu dojde k zaznamenání dat v digitální formě při osvětlování objektu laserem, jako je tomu v klasické holografii, ovšem místo destičky s fotografickou emulzí jsou data zaznamenána např. na CCD senzor. Další práce s nimi je již za pomoci počítače. Druhý používaný přístup označuje spíše opačný proces, kdy jsou data zprvu vygenerována počítačem. Optický vzor, který se vytváří na fotografické destičce při tvorbě klasického hologramu, se poté může vytisknout a použít ke klasické rekonstrukci hologramu. Tento proces má nesmírnou výhodu v tom, že není potřeba vůbec žádný objekt jako předloha. Často lze najít tuto podoblast holografie pod názvem CGH (vysvětleno v úvodu výše).

V závislosti na použití existuje několik metod na zpracování digitálních holografických dat. Jak již bylo zmíněno, ty mohou být použity jak ve fázi tvoření hologramu, tak i při jeho analýze. Používané algoritmy jsou např. úhlové spektrum (angular spectrum), Fresnelova, Fraunhoferova a Fourierova transformační metoda.

Digitální holografie simuluje nahrávací proces optické holografie. V závislosti na použitém algoritmu jsou vlnoplochy, které jsou rozptýlené od objektů, skládány a následně analyzovány počítačem. Ty jsou numericky definovány. Pokrok této oblasti v předchozích letech je připsán rovněž rychlému vývoji počítačové architektury, výpočetních metod a optické technologii. Narozdíl od optických hologramů, u digitálních není nutné se zabývat rozšířením světla. Proto se práce v této oblasti zaměřila především na formování a vykreslení objektů. Zde je možné zobrazit fiktivní objekt, neexistující v reálném světě. Práce s nimi je jednodušší, jelikož data jsou elektronicky uchována v souboru. Ovšem tato vlastnost je u optických hologramů kompenzována lepším rozlišením, které poskytuje holografický film.

Výhoda takového zpracování a vytvoření hologramu je na snadě - není nutné se zabírat chemickými procesy a dalšími kroky, které jsou nutné k vyvolání a vytvoření klasického (nedigitálního) hologramu. Samozřejmě se otevírají dveře i lepší flexibilitě

a kontrole nad výsledným produktem. Je-li tvořen digitálně, odpadá veškerá činnost spojená s pořízením nového - stačí jen změnit vstupní parametry jako velikost či rozlišení anebo načíst nová data. To může být realizováno téměř v reálném čase. Poměrnému rozšíření v dnešní době vděčí toto odvětví také především rozmachu vysoce kvalitních digitálních kamer.

Co se týče výhod či nevýhod mezi optickým a digitálním hologramem, tak to je velmi obtížně rozlišitelné. Ale nevýhodou digitálního hologramu je horší kvalita v oblasti rozlišení, barvy a ostroty obrazu. [5, 7]

Část II

Porovnání vlastností jednotlivých principů

3 Integrální metoda

Integrální zobrazování umožňuje vyobrazit trojrozměrný obraz, aniž by pozorovatel musel používat jakékoliv speciální brýle nebo jiné podobné prostředky k prohlížení obrázků. Toho je dosaženo použitím pole miniaturních čoček, umístěného před obrazem. Místo obvyklého 2D obrázku je zde produkováno třírozměrné světelné pole, vytvářející stereoobrázky, které vykazují paralaxu (tzn. pod různým úhlem pohledu lze vidět obraz z jiného směru).

Pro jednoduchou představu, necht' máme fotografii, na níž jsou dva objekty vedle sebe, například koule a krychle. Pakliže bude fotografie pořízena dostatečně obratně, běžný pozorovatel nebude moci rozpoznat, zda jsou objekty stejně velké anebo zda je jeden z nich jenom blíže aparátu a je tudíž menší. Ovšem tento nedostatek je u fotografií pořízených integrální metodou kompenzován, protože je nám umožněno více pohledů na jednu scénu (více pohledů - pod jinými úhly).

Celkový integrální obraz (Obrázek 14) se skládá z velkého množství maličkých obrázků, na které se pozorovatel dívá skrz pole konvexních čoček, každá odpovídá jednomu obrázku. Název vychází z integrace (sjednocení, splynutí) všech těchto miniobrázků do jednoho většího celku. Pokud vše proběhlo jak má, výsledkem je 3D obraz, který navozuje skutečnost předmětu na obraze, rovnající se jedině hologramům velmi vysoké kvality. Integrální obraz tak dokáže reprodukovat vlnoplochy ze snímaného předmětu, stejně jako hologram, ovšem bez potřeby laseru. Díky tomu můžou oči zaostřit jak na bližší, tak na vzdálenější body na obrázku.



Obrázek 14: Integrální fotografie

Integrální metoda je zcela založena na principu vzorkovacího efektu. Aby ho bylo dosaženo, musí být zvolena taková tloušťka čoček, že příchozí paprsky se střetávají po průchodu čočkou v jednom bodě na rovině. Tato rovina se nazývá ohnisková a právě na ní se nacházejí zmíněné miniaturní obrázky. Závisí pak na úhlu, pod kterým se pozorovatel dívá, jaký bod obrázku vidí. Rozlišení takového obrazu je určeno hustotou čoček v poli, protože se každá stává bodem či pixelem výsledného

obrazu. Žádná fotografie, která je pořízena běžně dostupnými metodami za použití jediné čočky, nemůže nabídnout tak jasný přehled co se týče hloubky zobrazované scény nebo objektu. Při bližším pohledu na běžnou fotografii může pozorovateli uniknout mnoho detailů, což se u této fotky nestane tak snadno. [3]

4 Holografie

4.1 Využití hologramů

Zobrazení předmětů

Díky velké hloubce obrazové scény a širokému úhlu pozorování se hologramy používají k zpřístupnění vzácných archivovaných předmětů. O tomto využití bylo již řečeno mnoho (v předchozí sekci 2.4). Zobrazování předmětů a objektů rovněž nabízí odvětví digitální holografie, stejně jako CGH.

Datový záznam

Myšlenka využití hologramu k zaznamenávání binárních dat pochází z roku 1963. Jejím autorem je Pieter van Heerden, tehdejší zaměstnanec firmy Polaroid. Svazek paprsků se rozdělí na dva - referenční a objektový. Poté, co projde objektový svazek maticí tmavých a čirých pixelů, které reprezentují jednotlivé datové bity, dojde k interferenci s referenčním svazkem uvnitř destičky citlivé na světlo. Data uložená ve výsledné matici se získají poté, co se osvítí referenčním svazkem pod stejným úhlem, pod kterým záznam vznikl. Hustotu dat, uložených na jednom nosiči je možné zvýšit za použití jiné frekvence anebo úhlu referenčního svazku paprsků.

Použití holografie jako metody ukládání datových záznamů vypadá poměrně slibně. Na rozdíl od dnes běžných optických nosičů jako jsou DVD nebo Blu-ray disky, ukládání pomocí holografie umožňuje trojrozměrný zápis díky krystalům fotopolymerů. Jedná se o polymer specificky reagující na světlo (nejčastěji ztvrdnutím). Ty tvoří datovou vrstvu média. Stávající prostorový světelný modulátor (označovaný jako SLM - spatial light modulator) dokáže produkovat tisíc různých obrázků za sekundu při rozlišení 1024×1024 pixelů. Za použití správného typu média (nejspíše fotopolymerů) by rychlost zápisu mohla dosáhnout 1 Gb za sekundu. U rychlosti čtení jsou experti ještě víc optimističtí, ta by mohla dosahovat až 1 Tb za sekundu.

Ovšem poměrně značnou nevýhodou je, že tento materiál nedovoluje přepisovat nahraná data, a tudíž opravit případné chyby není možné. Na druhou stranu mezi nesporné výhody takového média by patřilo rychlé vyhledávání, čtení a zápis či velká kapacita. S holografickým diskem bychom se mohli setkat dle střízlivých odhadů snad kolem roku 2020. [4]

Bezpečnostní prvek

Tyto hologramy jsou často lisované a používají se jako zabezpečovací prvky, např. pro bankovky nebo jiné produkty, u kterých je potřeba, aby byly chráněny proti padělání. Takovéto uplatnění je především díky své unikátnosti a možnosti pozorování

hologramu i pod bílým světlem. Průkopníkem podobných technologií byl časopis National Geographic, který použil v roce 1984 na obálku obrázků, který měl třetí rozměr.

Jako zabezpečení se používají také proto, že jednotlivé hologramy jsou repliky vzoru, který je poměrně obtížné vyrobit a vyžaduje to velmi technologicky pokročilou výbavu. Ovšem takovýto typ hologramu je zcela něco jiného než zmíněné výše. Pojem „hologram“ se zde uchytil v druhotném významu, a to díky rozšíření vícevrstevných obrázků. Jedná se vlastně o dva nebo více obrázků navrstvených na sebe, kdy každý je viditelný pod jiným úhlem. [4]

Umění

K spojení holografie a umělecké oblasti často dojde v případě, že vědec se o umění zajímá nebo se za umělce aspoň zčásti považuje. Za průkopníka v této oblasti se považoval Salvador Dalí, ale jeho první holografická výstava v roce 1972 byla předstihnutá jinou uměleckou výstavou hologramů v Cranbrook v Michiganu 1968 a následně o 2 roky později i další v New Yorku. Ovšem málo umělců používá hologram jako svůj jediný prostředek, spíše lze najít případy, kdy jsou holografické prvky začleněny do díla jako celku. [4]

5 Porovnání

Oba způsoby, jak holografie, tak integrální metoda, se zabývají prostorovým zobrazením předmětů. Ať se již jedná o hologram v digitální či klasické formě. Dále mají obě společný základní princip, a to práci se světelnými paprsky, které se odrážejí od zachycovaného objektu. Je velmi obtížné říci, která z nich je obecně lepší nebo výhodnější. Faktem ale zůstává, že holografie má lehce širší možnosti uplatnění (připomenu například využití jako datová úložiště), tudíž je poměrně složité tato dvě odvětví porovnávat.

Integrální metoda má oproti holografii nespornou výhodu, a to že k provedení nahrání nepotřebuje laser (popř. i k následné rekonstrukci obrazu). Vystačí si s klasickým bílým světlem. Na druhou stranu, omezení ve formě mřížky čoček, která vlastně reprezentuje maximální možné rozlišení, se řadí spíše mezi nevýhody. Jelikož vyvstává otázka, jak daleko může miniaturizace čoček zajít, aby bylo možné je vyrobit a použít. Tento směr jistě není neomezený.

Pro holografii však platí opak. Rozlišení obrazu zde závisí na velikosti interferenčního vzoru, který se nahraje na záznamovou destičku. Jednoznačná výhoda u hologramu je rovněž jeho poměrně vysoká kapacita úložiště informací. Jak již bylo zmíněno výše, každá část hologramu (ať už je sebemenší) obsahuje informace o celé scéně a je tudíž schopná při jistém omezení (snížení ostrosti obrazu) kompletní rekonstrukce celé scény.

Dle stávajících trendů se zdá, že oba principy najdou své uplatnění v rozličných odvětvích a oborech. Od vytěsnění klasických fotografií, jak je známe dnes, přes nová datová úložiště místo DVD a jiných disků, až po prostředek k vyjádření uměleckého citění. Integrální zobrazování má ovšem užší obor využití oproti holografii, především

proto, že se jedná v zásadě „jen“ o způsob zachycení trojrozměrného obrazu. Nejedná se však o způsob zabezpečení proti falzifikaci, ani v sobě neskrývá potenciál pro vznik nového datového úložiště.

Ovšem jak to nakonec vše dopadne a která z daných metod způsobí revoluci v oblasti rekonstrukce 3D obrazů, je nyní nikoliv ve hvězdách, ale v rukou odborníků v daných oblastech.

Část III

Ověření funkcionality SDK Holo Toolkitu a vygenerování digitálního hologramu pro vybrané scény

Hlavním úkolem, kterému je věnována tato část, bylo seznámení se s balíkem aplikací SDK Holo Toolkit (dále jen „holokit“). V rámci tohoto procesu poté zpracovat různá vstupní data, včetně nově vytvořených, a z nich ve finále vygenerovat digitální hologramy.

6 Popis SDK Holo Toolkitu

Holokit je sada aplikací, které slouží k vytvoření digitálních hologramů a jejich vizualizaci. Samotný balík je tvořen celkem devíti aplikacemi, které je možno přeložit a sestavit na platformách Linux i Windows, jelikož jsou k dispozici zdrojové kódy. Samozřejmě je součástí i soubor *readme.txt*, který obsahuje návod jak na to. Následuje výčet a krátký popis jednotlivých složek, nikoliv z hlediska naprogramování a vnitřní struktury jednotlivých aplikací, nýbrž spíše z uživatelského pohledu a ovládání. Ovšem pro detailnější informace bych odkázal na nápovědu holokitu.

6.1 Formát vstupních dat

Načítaná vstupní data musí být ve formátu XML se specifickou vnitřní strukturou. Dosáhnout tohoto by bylo pro klasického uživatele poměrně obtížné, pokud by takovéto vstupy měl psát ručně sám. Proto je ve složce *scripts* napsaný jednoduchý skript pro 3D Studio MAX, který umožní export načteného modelu relativně libovolné scény do správného vstupního formátu.

Zda vše proběhlo v pořádku jak má, je možno zjistit pomocí validace exportovaného XML souboru za pomoci XSD validačního schématu, které lze najít ve složce *xsd*. Je nezbytné, aby formát dat byl zcela přesný a odpovídal tomuto předpisu. V opačném případě by mohlo dojít k špatné interpretaci dat, ovšem tomuto je zabráněno vlastní implementací validace uvnitř jednotlivých aplikací, které data zpracovávají. Zmíněná validace probíhá totiž i uvnitř samotných aplikací při načítání dat.

Pokud máme tedy připravená data ve správném formátu, můžeme přistoupit k samotnému zpracování a generování hologramu.

6.2 Nastavení konfiguračních souborů

Jednotlivým aplikacím před samotným spuštěním je nutno rovněž nastavit správné parametry. Tyto konfigurační soubory mají též strukturu XML souboru a datové

typy, které holokit podporuje, jsou *double* (reálná čísla), *integer* (celá čísla), *boolean* (true / false) a *string* (řetězec).

Každá část holokitu má vlastní konfigurační soubor, se stejným názvem jako aplikace sama. Ten je načítán primárně, pokud bychom si však přáli použít jiný konfigurační soubor, je možné takto učinit při spuštění aplikace pomocí přepínače „-c“ a bezprostředně za tímto příkazem musíme uvést název nového konfiguračního souboru. Výsledný příkaz by vypadal například takto:

```
HoloPropragLarge.exe -cnewconfig.xml
```

Přesný popis veškerých atributů a jejich nastavení lze dohledat v nápovědě k patřičnému programu.

6.3 Jednotlivé aplikace

Následující popis aplikací je jen zevrubný a koncipován tak, aby byl pro běžného uživatele stravitelný a ten byl schopen jednak s programem pracovat a rovněž měl trochu představu, co a proč dělá. Pro detailní popis významu jednotlivých parametrů a podstaty funkcí ve všech případech odkazují na nápovědu holokitu, kde je vše podrobně popsáno.

HoloCalculator

Jedná se o jednoduchou aplikaci napsanou v .NETu, která velmi zjednodušuje práci s holokitem. Umožňuje dle vstupních parametrů dopočítat další hodnoty, které jsou potřeba pro konfigurační soubory používaných aplikací.

Je možno si vybrat z jednotek jak délkových (metry, centimetry, milimetry), tak i úhlových (radiány či stupně). Ovšem zde bych upozornil na fakt, že konfigurační soubory vyžadují hodnoty ve stupních, kdežto zde jsou implicitně přednastaveny radiány. Takováto nepozornost může způsobit poměrně těžko odhalitelný problém při práci s holokitem.

Aplikace rovněž umožní vygenerovat část XML souboru (s navolenými parametry) pomocí příslušných tlačítek, tato data jsou poté vložena do schránky.

HoloFullSourceCU

Zde je vygenerováno optické pole na rovině $z = 0$ z oblaku bodů. Ten je umístěn v kladné oblasti osy z , kdežto zdroje jsou umístěny na opačné straně. Viditelnost se neřeší. Jelikož je šíře optického pole specifikována uživatelem, jeho výška je omezena podporovanou maximální možnou hodnotou.

Oblak bodů je možné načíst ze souboru ve formátu DOTS anebo opět XML, výstupem je soubor DF.

HoloFullSynthGPU

Program vygeneruje digitální hologram za použití metody úhlového vzorkování (angular sampling). Jak již název napovídá, o většinu výpočtů se zde stará grafický procesor.

Opět probíhá generování optické scény v kladné části osy z , tudíž je nutné aby objekt nepřesahoval mimo tento rozsah. Intenzita osvětlení povrchu objektů je počítána Phongovým osvětlovacím modelem, kdy ze tří barevných složek se poskládá jedna finální barva. Počáteční fáze je rovna 0, ale lze ji nastavit na pseudonáhodné číslo.

Velikost výsledného optického pole je omezena jenom používaným grafickým jádrem (uváděný limit je 8192×8192) a dostupnou velikostí paměti (vytvářené optické pole se musí vejít do paměti třikrát). Pokud jsou počítána větší optická pole, než umožní grafická karta, jsou data rozdělena na menší části. Ovšem ve výsledku naroste celkový výpočetní čas.

Aplikace rovněž umožňuje v případě selhání běhu zachování vypočtených částí a jejich využití v následujícím spuštění. Není tudíž nutné tyto části počítat znovu. Ve finále se všechny části spojí do jednoho souboru DF.

Výstupem je tudíž klasický DF soubor obsahující informace o optickém poli, vstupem jsou data v XML formátu.

HoloGenCPU

Aplikace vypočte digitální hologram virtuální scény. Proces zahrnuje několik algoritmů generování hologramu - pro bližší popis odkazují do nápovědy holokitu.

Vstupem jsou opět data v XML formátu, výstupem opět DF soubor.

HoloGenMPI

Tato aplikace používá stejné algoritmy jako předchozí popsaná, ovšem umožňuje distribuci jednotlivých výpočtů mezi více počítačů. Ovšem není již zahrnuto spojení a vyhodnocení vypočtených dat, to závisí jen na uživateli.

Vstup je klasický XML soubor s příslušnými daty.

HoloGenMPIConnect

Tento program slouží ke spojení výstupů vygenerovaných aplikací HoloGenMPI. Za použití seznamu bloků vytvořených předchozím programem dojde ke spojení do jednolitého DF souboru. Vstupem zde jsou soubory s příponou *raw*, které musí mít přesně stanovený název - *Block####.raw* - kde #### je číslo bloku.

HoloHalfSynthCU

Zde se jedná o program, který počítá vzorky optického pole. Ty se generují opět v kladné části osy z a neobsahují vertikální paralaxu, i když hologramy z nich vygenerované lze zrekonstruovat s celou paralaxou. Šířka optického pole je stanovena uživatelem, výška používaným algoritmem.

Scéna je opět načtena z XML souboru. Je nutné, aby byly veškeré objekty před rovinou xy . Světelná intenzita na povrchu objektů je vypočtena opět za použití Phongova osvětlovacího modelu a výsledná tříšložková barva je použita na stanovení hodnoty šedivé barvy. Počáteční fáze je rovna 0, lze ji nastavit jako pseudonáhodné číslo. Výsledné optické pole je sestaveno z vodorovných pruhů. Vzdálenost mezi nimi je konstantní a každý pruh odpovídá řádce v optickém poli. Výstup je již tradiční DF soubor.

DFtoHologram

Tato aplikace provádí výpočet hologramu ze souboru DF, ve kterém je uloženo optické pole. Konkrétně je toho dosaženo přidáním referenční vlny a následným výpočtem intenzity. Jako referenční vlna je použita běžná rovinná vlna a intenzita je brána maximální možná ze vstupního optického pole. Aplikace je optimalizovaná na zpracování souborů větších než je dostupná paměť počítače, zpracovávaná data se v takovém případě rozdělí na několik částí.

Vytvořený hologram je pole pixelů, přičemž je podporováno několik typů hologramu. Implicitně je nastaven normalizovaný hologram v odstínech šedé, další volbou jsou různé binární hologramy.

HoloPropagLarge

Tato aplikace umožní propagaci optického pole mezi dvě roviny (jinak řečeno dojde k vizualizaci hologramu). Používá se algoritmus *angular spectrum*. Celé optické pole se musí vejít do paměti počítače. Pro jednotlivé příkazy je používán vlastní jazyk, založený na PostScriptu. Možné příkazy a jejich význam lze opět dohledat v nápovědě k této aplikaci.

Jako vstup slouží jak soubor DF, TGA (nekomprimovaný obrázek v šedivé škále barev) anebo PNG obrázek. Výstupem můžou být soubory o stejných formátech jako vstupy.

6.4 Shrnutí

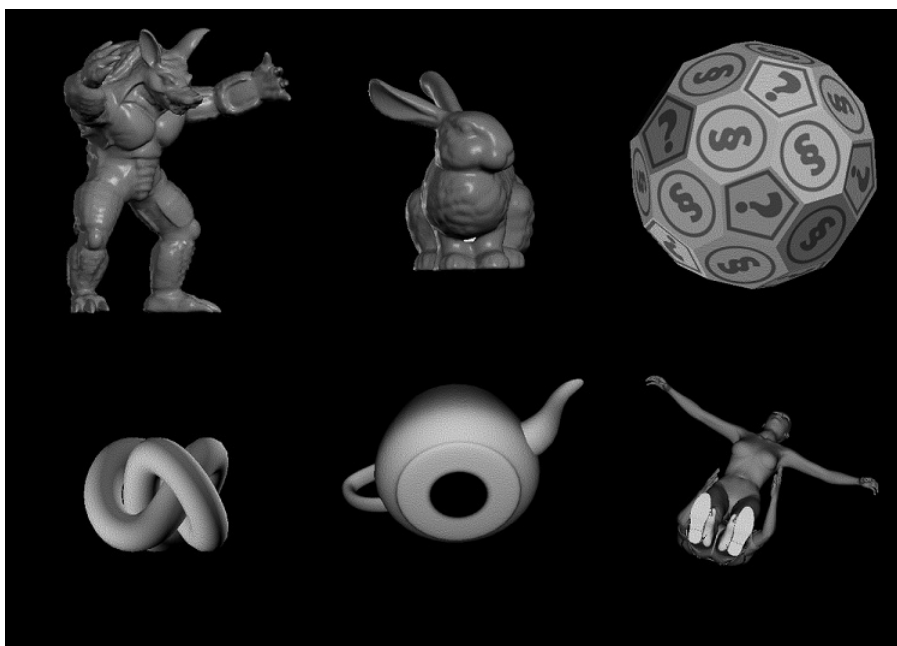
Pokud bychom si tedy přáli vygenerovat digitální hologram, je nutné k tomu mít vstupní data v XML souboru v konkrétním formátu. Tato data je možno exportovat pomocí přiloženého skriptu z 3D Studio MAX a formát lze překontrolovat pomocí XSD validačního schématu.

Následuje zpracování těchto dat pomocí aplikace dle našeho záměru (HoloHalfSynthCU, HoloFullSynthGPU atd.), která má výstup soubor s příponou DF a vstupem je XML soubor. Jak bylo zmíněno výše, DF soubor reprezentuje optické pole hologramu. Z něj již poté lze vygenerovat jak hologram (DFtoHologram), tak i případnou vizualizaci hologramu (resp. propagaci) (HoloPropagLarge) při nastavení správných parametrů. Ty nám pomůže zjistit aplikace HoloCalculator. Některé ovšem budeme muset nastavit jen v závislosti na našem uvážení a v případě nedostatku informací o produkovaném objektu často i zkoušet experimentální formou.

7 Vygenerování digitálního hologramu pro vybrané scény

V rámci ověření funkcionality holokitu byly vygenerovány mnohé hologramy a jejich vizualizace. Některé byly méně úspěšné, jiné více. Vzhledem k spíše testovací povaze tohoto úkolu bylo zvoleno rozlišení hologramu na 512×512 pixelů, aby nebylo nutno na výsledky čekat příliš dlouhou dobu. Faktem totiž zůstává, že neúspěšných pokusů bylo více než těch úspěšných, převážně proto, že jsem neměl dostatek informací o generovaných objektech.

Z dostupných modelových dat, které již byly součástí holokitu, byly použity především *Armadillo-isetter6.xml*, *Bunny-isetter6-white.xml*, *Icosa-isetter6.xml*, *Knot-isetter2.xml*. Vstupních dat bylo k dispozici mnohem více, leč z nedostatku času a vzhledem k celkem uspokojivým výsledkům se nezdálo nutné, aby byly testovány všechny. Tyto vybrané scény reprezentují jakousi postavičku pásovice (Armadillo), zajíčka (Bunny), dvacetistěn (Icosa) a uzlík (Knot). Ukázky modelů (nikoliv hologramů) jsou vyobrazeny¹ níže, viz Obrázek 15. Rovněž byly dva vstupní soubory vygenerovány nově, aby bylo možno vyzkoušet, že tato data nejsou nijak modifikována pro účelnou funkčnost. Jedná se o soubory *Teapot.xml* a *Titanic.xml*. První z nich reprezentuje čajovou konvičku a druhý dvě postavy, vzájemně se držící jako tomu bylo na přídi parníku Titanic. Oba modely jsou rovněž vyobrazeny níže.



Obrázek 15: Používané modely

Celkem bylo vytvořeno poměrně velké množství hologramů různých vlastností a kvalit pod různými aplikacemi holokitu, ale ne každý byl zdařilý. Někaký hologram se pomocí aplikací, vytvářejících DF soubor, podařilo vygenerovat vždy. Ovšem z pouhého pohledu na něj není možné rozpoznat, zda se jedná o správný výstup (pokud není vizualizace DF souboru čistě černý obrázek, pak se jistě jedná o špatný výstup).

¹všechny jsou velikostně upraveny pro toto použití

Jako relativně slabší kontrola sloužila aplikace *HoloPropagLarge*, která provede propagaci hologramu, tudíž poté už by měl být objekt vidět. Ale slabší proto, že pro úspěšnou rekonstrukci je nutno nastavit minimálně parametr vzdálenosti, ve které dojde k vizualizaci hologramu. Optimální hodnotu vzdálenosti však není lehké najít a nejčastěji byla dosažena experimentálním způsobem, kdy se měnila vzdálenost po malých krocích a výsledek byl porovnáván na zlepšení či nikoliv.

Tímto způsobem byly vygenerovány hologramy a jejich vizualizace k modelům *Armadillo*, *Bunny*, *Knot* a *Teapot*. Vzhledem k celkem uspokojivým výsledkům, ostatní modely nebyly příliš detailně testovány. Výstupy nebyly nijak perfektně ostré, ale vždy bylo dosaženo takové úrovně rekonstrukce, že šlo s určitostí říci o jaký model se jedná a mnohdy bylo možno i rozpoznat různé detaily.

Část IV

Rekonstrukce vypočteného hologramu

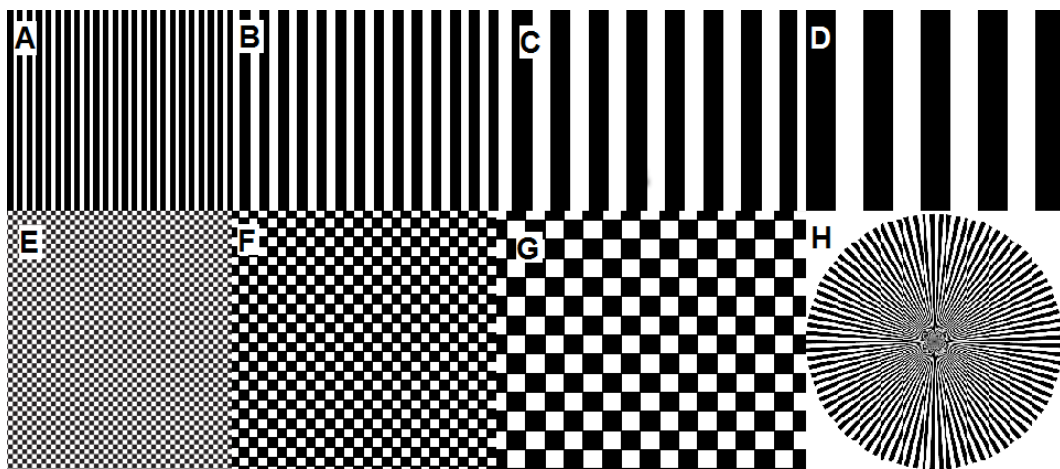
Hlavním úkolem této části bylo zpracovat holokitem vygenerovaná data do podoby reálného hologramu. Konkrétně se jedná o přenesení optického pole hologramu (vizualizace DF souboru) na film, po jehož vyvolání a prosvícení laserem by mělo dojít k rekonstrukci odpovídajícího obrazu. Vzhledem k dostupnosti byl zvolen ještě sehnatelný klasický film 6×6 cm značky Fomapan (s citlivostí 100 ASA), kvůli lepším vlastnostem pro toto využití oproti běžnému kinofilmu. Používaný zrcadlový fotoaparát byl značky Pentacon six TL, s ohniskovou vzdáleností objektivu 80 milimetrů.

8 Příprava

Po pečlivém zvážení všech dostupných prostředků a pečlivé domluvě jsme se však usnesli, že bude lepší nejprve vyfotit jednoduché vzory specifických vlastností. Tím si ověříme, zda je tento způsob dostačující pro použití jako předloha hologramu a rovněž jakou jemnost film přibližně má.

8.1 Navržení vzorů

Zmíněných vzorů bylo celkem osm (ukázka viz následující Obrázek 16), pro přehled níže byly všechny upraveny. Všechny byly vytvořeny ve vektorovém editoru. V zásadě se jedná o tři základní typy vzoru - mřížky, šachovnice a kruh. Mřížky mají ve skutečnosti rozměry 0,5 mm (A), 1 mm (B), 2 mm (C), 3 mm (D) a šachovnice 0,5 mm (E), 1 mm (F), 2 mm (G) a vzor H v nejširší části (na krajích) 5 mm.



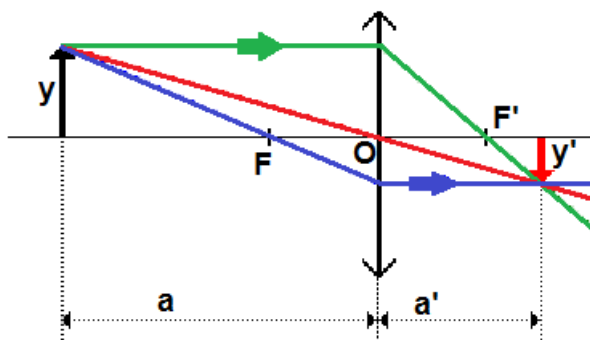
Obrázek 16: Vzory

Všechny vzory byly vytištěny na pevnější papír formátu A3+ a navíc byl vytištěn ještě celý černý, pro jednodušší srovnání intenzity černé po vyvolání.

8.2 Výpočet parametrů scény

Ze zobrazovací rovnice (19) a prosté podobnosti trojúhelníků² byla vypočítána potřebná vzdálenost, na jakou se fotografie měly pořizovat. Dle záměru, aby šířka 1 mm ve skutečnosti (vzor) byla 10 μm na filmu (obraz), byla vypočtena potřebná vzdálenost umístění fotoaparátu od vzorů.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (19)$$



Obrázek 17: Zobrazení čočkou

Z trojúhelníkové podobnosti byla vyjádřena vzdálenost a' (vztah (20)) a ten poté dosazen do výše zmíněné rovnice. Při pohledu na Obrázek 17, z používaných proměnných známe y a y' , reprezentující velikosti vzoru a obrazu.

$$\frac{y}{y'} = \frac{a}{a'} \Rightarrow a' = \frac{ay'}{y} \quad (20)$$

Tudíž dosazením tohoto vztahu do zobrazovací rovnice dostaneme výsledný vztah:

$$\frac{1}{a} + \frac{y}{ay'} = \frac{1}{f} \quad (21)$$

Přičemž ohnisková vzdálenost objektivu $f = 80 \text{ mm}$ a námi zamýšlený vzor velikosti $y = 1 \text{ mm}$ měl mít ve finále velikost $y' = 0,01 \text{ mm}$. Vzdálenost a po výpočtu vyšla 8080 mm. Čili na zachycení scény dle našich předpokladů bylo nutné umístit fotoaparát cca 8 metrů od ní.

Jelikož fotoaparát umožňoval délku expozice nejvýše 1 sekundu, byla použita clona s hodnotou 8. Všechny vzory byly přichyceny na stěnu a poté vyfoceny nejprve horizontálně (vůči mřížkám), poté vertikálně a nakonec natočeny přibližně o 45° (včetně šachovnic). Bylo pořizeno osm snímků ve vypočtené vzdálenosti 8 metrů, poté dva v maximální možné (cca 10 metrů) a nakonec dva v poloviční, tedy 4 metry.

²podobné trojúhelníky mají konstantní poměr odpovídajících stran

8.3 Analýza výsledků

Film byl pak vyvolán a následně prostudován. Nejprve pod mikroskopem, kde bylo možno vidět podrobně, jak je barva na filmu nanášena a rozložena. Při pozorování vzorů širokých méně než 2 milimetry (foceno ze vzdálenosti 8 metrů) ovšem na filmu nebylo mnoho patrné. Vzory o šíři 1 milimetru byly poměrně rozpitě a neostře, leč stále rozpoznatelné. Ovšem půlmilimetrová mřížka či šachovnice nebyly patrné už vůbec.

Poté se přešlo k další fázi, a to prosvícení filmu laserem, aby se mohlo zjistit, který ze vzorů způsobuje difrakci a který už ne. Byl použitý běžný červený laser o vlnové délce $\lambda = 635 \text{ nm}$. Každý ze vzorů byl prosvícen a experimentálně byla potvrzena analýza filmu pod mikroskopem. Vzory o minimální šířce 2 milimetrů (pořízené ze vzdálenosti 8 metrů) způsobovaly kříženou difrakci. U mřížky se paprsek rozložil horizontálně či vertikálně (v závislosti na natočení filmu potažmo pozici vzoru při focení), čili místo jednoho svazku paprsků jich na stěnu dopadlo více, s konstantním krokem. V případě šachovnice došlo k rozdělení po celé ploše, nejen v jednom směru, a byl vytvořen obrazec připomínající číslo 5 na hrací kostce. V případě kruhu (vzor H) docházelo k rozptýlení paprsku po obvodu, čili na stěně či stínítku byla poté patrná červená paprscitá kružnice. Na prosvícení podobně reagovaly i silnější vzory. U vzorů, které byly pořízeny v poloviční vzdálenosti 4 metrů samozřejmě vyhovovaly i o polovinu jemnější, tudíž o šířce 1 mm.

Čili experimentálně bylo zjištěno, že u snímků pořízených ve vzdálenosti 8 m způsobovaly difrakci vzory C, D, G, H. Tudíž nejjemnějším vyhovujícím vzorem byla mřížka či šachovnice velikosti 2 mm. Z tohoto pozorování bylo možné vyvodit, že jemnost filmu je přibližně $20 \mu\text{m}$.

9 Rekonstrukce hologramu

Tato fáze měla rovněž několik částí. Všem předcházelo několik výpočtů potřebných parametrů, aby bylo jasné, jak velký hologram má cenu generovat s přihlédnutím na dostupnost techniky a možnosti tisku. Poté následovalo vygenerování optického pole hologramu za pomoci holokitu pro jednu vybranou scénu. Toto optické pole bylo vtištěno a nafoceno za použití téhož fotoaparátu opět na film $6 \times 6 \text{ cm}$. Film po vyvolání a prosvícení laserem měl rekonstruovat hologram předlohy, která byla zpracována holokitem.

9.1 Specifikace parametrů pro hologram

Veškeré výpočty vycházely z poznání, že jemnost filmu je přibližně $20 \mu\text{m}$, tudíž velikost pixelu na filmu nesměla být nižší než tato hodnota. Pomocí aplikace Ho-LoCalculator, která je součástí holokitu, bylo zjištěno při zadání vzdálenosti dvou pixelů (parametr „pitch“) a rozlišení, jak velký hologram ve skutečnosti bude. Pitch byl stanoven dle jemnosti filmu na $20 \mu\text{m}$ a rozlišení na 1400×1400 pixelů. Z těchto dvou hodnot aplikace stanovila velikost hologramu na 2,9 cm, což je dostačující vzhledem k tomuto ověření.

Další omezení představovala možnosti tisku, kdy nebylo možné vytisknout širší obrázek než 1 metr. Bylo nutné tudíž vypočítat, z jaké vzdálenosti je nutno pořídit snímek, aby právě velikost jednoho pixelu odpovídala hraniční jemnosti filmu. Poté již bylo možno vytištěnou scénu vyfotit, film vyvolat a zjistit, zda vše dopadlo dle předpokladů.

9.2 Výpočet potřebných hodnot

Nejprve bylo nutné zjistit, jak velký pixel bude po vytištění optického pole hologramu. To nebylo nic těžkého, při rozlišení 1400×1400 pixelů a šířce plakátu 1 metr vycházela velikost 1 pixelu na $\frac{5}{7}$ mm přesně. Nyní bylo možné za použití již známé podobnosti trojúhelníků a zobrazovací rovnice (zmíněno výše, v podsekcí 8.2) zjistit, jak daleko umístit fotoaparát od scény.

Vstupními parametry byly tentokrát velikost vzoru $y = \frac{5}{7}$ mm, obrazu $y' = 0,02$ mm. Z těchto hodnot byla spočtena stejným vztahem, jak již bylo zmíněno, potřebná minimální vzdálenost na 2,94 metru. Jen pro kontrolu byl proveden ještě jeden výpočet. Jednalo se o to, aby se plakát o šířce 1 metru vešel celý na film 6×6 cm, při výše vypočtené vzdálenosti. Opět byly použity již známé vztahy, přičemž nyní byla velikost vzoru (plakát) $y = 1$ m a velikost obrazu (film) $y' = 6$ cm. Tato vzdálenost, minimální pro zachycení celého plakátu, vyšla zhruba 1,4 metru. Jelikož se jednalo o délku dostatečně menší než bylo potřeba, zbylo dost místa na scéně pro umístění dalších objektů mimo foceného optického pole. Nyní se mohlo přejít k samotnému generování hologramu.

9.3 Generování hologramu

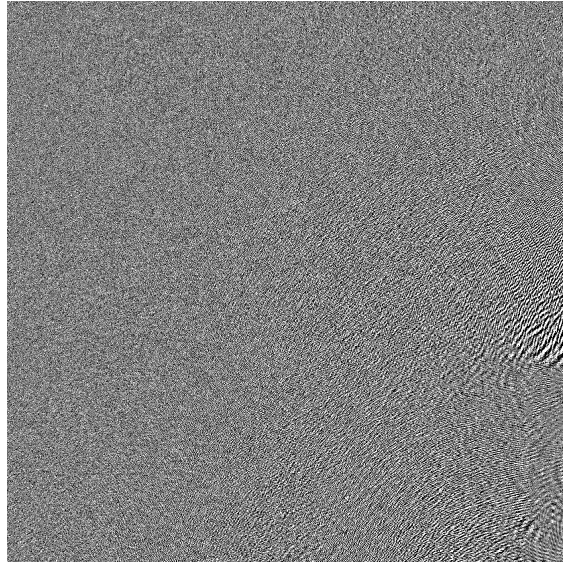
Jako další krok tudíž následovala práce s holokitem. Z vybraných dostupných modelů byl zvolen objekt popsáný v XML souboru s názvem „Armadillo-isetter6”. Při náhledu do obsahu tohoto souboru se jednalo o model popsáný přibližně 16000 body a 32000 plochami.

Z dostupných aplikací pro vygenerování optického pole byla zvolena „HoloFullSynthGPU”, vzhledem k používané počítačové sestavě³. Před spuštěním samotného výpočtu bylo nutné nastavit potřebné parametry konfiguračního souboru pro tuto aplikaci. Rozlišení hologramu (Resolution) bylo již zmíněných 1400 pixelů v obou osách, pitch 0,02 mm. Z těchto parametrů za pomoci aplikace „HoloCalculator” byly dopočteny další dvě vstupní hodnoty a to FovDeg na 1,82 a FovDegStep na 0,0013. Zbývalo již jen nastavit pozici a směr kamery. Obě hodnoty v osách x a y byly nastaveny stejně, na střed objektu (zde konkrétně $x = 0.0011107$ a $y = 0.0000032$). Co se týče osy z , tak zde byly hodnoty nastaveny na 0,3 pro směr a -0,6 pro pozici. Velikost objektu (Scale) byla zvolena bez úprav na 1 (bez zvětšení či zmenšení) a ostatní parametry byly ponechány dle implicitního nastavení. Nyní již bylo vše připravené ke spuštění a vytvoření DF souboru. Celkový výpočet trval na vybrané počítačové sestavě přibližně 22 minut.

Výstupem byl soubor s příponou DF, který slouží jako vstup pro další aplikaci „DFtoHologram”. V konfiguračním souboru nebylo nutno nic měnit, kromě názvu

³počítač disponoval grafickou kartou ATI Radeon HD 5850

vstupního a výstupního souboru. Výpočet touto aplikací byl hotov za několik sekund a výstupem byl obrázek ve formátu PNG, který představuje vizualizaci obsahu DF souboru. Právě tuto vizualizaci bylo cílem získat. Výhodou je, že z pouhého pohledu na obrázek je možné říci, že se nám generování nepovedlo (v případě například pouze černé scény). Bohužel ovšem toto tvrzení neplatí opačně. Správným výstupem (jako v našem případě) je optické pole hologramu, viz Obrázek 18 níže (obrázek je zmenšen na 15% originálu).



Obrázek 18: Optické pole (výstup z DFtoHologram)

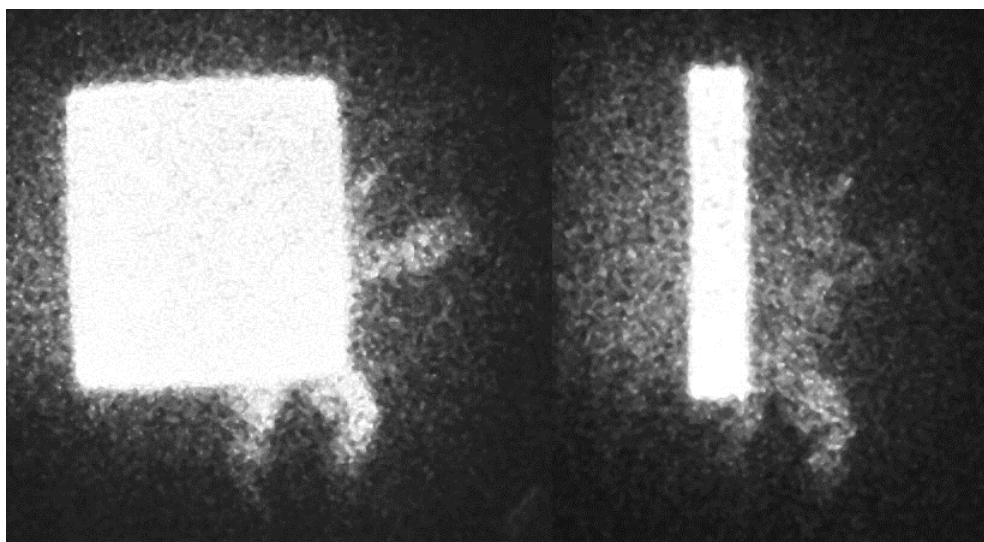
Pro ověření správnosti výpočtu byl tento DF soubor ještě použit další aplikací - „HoloPropagLarge”, která slouží k rekonstrukci a propagaci obrazu hologramu. V konfiguračním souboru byl nastaven stejný parametr „pitch” jako při prvotním generování na 0,02 mm, správný název vstupních a výstupních dat a rozlišení (zde FrameX a FrameY) na odpovídajících 1400×1400. Důležitým parametrem je ovšem atribut s názvem „Operations”. Jedná se o nastavení, jak daleko od pozorovatele dojde k propagaci. Je-li hodnota příliš nízká či vysoká, ve výstupu mnoho nevidíme, i když máme data v pořádku (popř. pouze „oblak” bodů). Nejvhodnější nastavení se v tomto případě hledá nejlépe zkoušením. Tento proces by se dal přirovnat k prohlížení optického hologramu, kdy rovněž je nutno zkusit několik úhlů pohledu a natočení hlavy či hologramu, než najdeme nejvhodnější pozici pro pozorování. V našem případě byla po několika pokusech nalezena optimální hodnota -1.246 (nesmí se zapomenout na příkaz „prop” za tímto údajem). Ovšem výsledek byl příliš tmavý na to, aby byl po vytištění dobře rozpoznatelný, proto zde není vyobrazen.

Jednalo se ale jen o počítačovou simulaci, podobný výstup bylo potřeba obdržet i v reálu za použití filmu. Nepříliš ostré zobrazení bylo přisouzeno nastavení, především zvolenému parametru „pitch”, jenž ovšem nebylo možno nastavit zcela libovolně vzhledem k dostupným možnostem. Objekt byl ale i tak docela dobře rozpoznatelný, většina rysů a tvarů jsou v porovnání s výchozím modelem poměrně dobře patrné.

9.4 Finální rekonstrukce hologramu

Získaná vizualizace DF souboru ve formátu PNG byla vytištěna jako plakát o šířce 1×1 metr. Fotoaparát byl umístěn do vypočtené vzdálenosti necelých 3 metrů a byla sestavena scéna. Jelikož obraz vytištěné předlohy hologramu byl menší, než celkový rozměr filmu, zbylo poměrně dost volného místa, které bylo vhodně využito. Kolem hologramu byly ještě umístěny vzory mřížky a šachovnice o tloušťce 0,5 mm a 1 mm (vzhledem k focení ze vzdálenosti 3 metrů, 1 mm by měl způsobovat difrakci a 0,5 mm se tímto mohlo zjistit) a rovněž kružnice.

Bylo pořízeno celkem šest snímků ve vypočtené vzdálenosti a vzhledem ke kapacitě filmu ještě jako experiment tři snímky ve vzdálenosti o 1 metr dále (cca 4 metry) a další tři o půl metru blíže (2,5 metru). Film byl poté vyvolán a následně podroben analýze. Nejprve byl film zkoumán pod mikroskopem, přičemž bylo zjištěno, že u snímků pořízených ve vypočtené vzdálenosti cca 3 metrů vzory o tloušťce 0,5 mm nejsou vůbec rozpoznatelné. Milimetrová mřížka byla vidět poměrně zřetelně oproti šachovnici, ačkoliv denzita (optická hustota) nebyla příliš dobrá. Při prosvícení laserem difrakci způsobovaly dle očekávání pouze tyto milimetrové vzory a kružnice. Poté se přešlo k samotnému rekonstruování hologramu.



Obrázek 19: Rekonstrukce hologramu

Laserový paprsek byl pomocí optických zařízení transformován do silnějšího rovnoběžného svazku, kterým byl prosvěcován film (vyfocení holografický vzor měl na filmu přibližně 2 cm). Rovněž byl k filmu přiložen papírový rámeček, aby laser procházel jenom skrz hologram. Při umístění stínítka do přibližně stejné vzdálenosti, jako byla hodnota odpovídajícího parametru při propagaci na počítači (kolem 1 metru), došlo k rekonstrukci obrazu hologramu a na stínítku byly patrné části objektu, především nohy, ucho a levá ruka. Ačkoliv bylo poměrně obtížné rekonstrukci zachytit, jsou tyto části vidět na předchozích snímcích (Obrázek 19). Ty byly pochopitelně pro tuto ukázkou upraveny, laser měl ve skutečnosti červenou barvu a velikost rekonstruovaného objektu byla kolem 2,5 cm.

Tento experiment je proto možno považovat za úspěšný, jelikož se dle zadání povedla rekonstrukce z digitálně vygenerovaných dat, přefocených na klasický film.

10 Závěr

Tématem této práce bylo bližší seznámení se s dvěma principy zobrazování trojrozměrných objektů - integrální fotografií a holografií. Ta samotná je rozdělena do čtyř základních částí. První polovina je věnována teoretickým záležitostem, druhá poté praktickým úkolům z oblasti holografie a ověření programového balíku Holo Toolkit.

Část I se konkrétně zabývá popisem integrální fotografie, principem šíření paprsků v prostoru a rovněž je zmíněna realizace tohoto návrhu v praxi. Dále je tato sekce věnována holografii obecně, typickým druhům hologramů, procesu nahrávání objektů a následnému rekonstruování obrazu. Druhá část se poté zabývá využitím a relativnímu porovnání jednotlivých přístupů. Jak bylo již zmíněno výše, srovnání za účelem jednoznačného tvrzení, který z nich je lepší, není úplně možné. Ačkoliv výsledek je v rámci možností porovnatelný, proces k jeho získání se poměrně liší. Skutečný potenciál se ukáže teprve časem, jelikož obě odvětví mají ještě značný prostor ke svému zdokonalování a vylepšování.

Část III a IV jsou praktického zaměření. První z nich se zabývá prací a otestováním programového balíku Holo Toolkit, který byl na fakultě vytvořen v roce 2008. Ten slouží k načtení objektu v patřičném formátu a následnému zpracování na holografická data popř. přímo až na vizualizaci hologramu. Jeho funkčnost byla ověřena na mnoha modelech, včetně nově vygenerovaných, a zpracování proběhlo pomocí více programů, které jsou součástí holokitu. V této části je obsažen rovněž stručný popis jednotlivých aplikací, ze kterých je balík tvořen. Poslední část navazuje na předcházející, jejím cílem byla rekonstrukce vygenerovaného hologramu. Jako předloha pro toto zadání byl používán model s názvem Armadillo, jehož hologram byl vytvořen v rozlišení 1400×1400 pixelů. Takovýto hologram byl poté vytištěn a nafocen na klasický fotografický film 6×6 cm pomocí zrcadlového fotoaparátu. Po vyvolání filmu a prosvícení laserem mělo dojít k rekonstrukci modelu, což se podařilo. Rekonstruovaný obraz byl poměrně dobře patrný (resp. jeho části) a tudíž je možno označit experiment za vydařený.

Téma, kterému se tato práce věnovala mně přišlo velmi zajímavé a nepochybně jsem získal mnoho nových zkušeností a informací z dané oblasti. Práci považuji za úspěšnou, jelikož splňuje veškeré požadavky, které na ni byly kladeny.

Reference

- [1] HARIHARAN, P. *Optical holography: principles, techniques and applications*. 2nd edition. Cambridge UK 1996. ISBN 978-0521439657
- [2] HARIHARAN, P. *Basics of Holography*. Cambridge UK 2002. ISBN 978-0-511-07643-5 (eBook)
- [3] WIKIPEDIA. Integral photography. *Wikipedia 2010*. Citováno v lednu 2010. Dostupné na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Integral_photography
- [4] WIKIPEDIA. Holography. *Wikipedia 2010*. Citováno v lednu 2010. Dostupné na:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
- [5] WIKIPEDIA. Digital holography. *Wikipedia 2010*. Citováno v březnu 2010. Dostupné na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_holography
- [6] INTEGRAF L.L.C., Tung. H. Jeong. *What Are the Main Types of Holograms Today?* Citováno v lednu 2010. Dostupné na:
http://www.holokits.com/a-Types_of_Holograms.htm
- [7] HOLOGRAM SUPPLIERS. Digital Hologram. Citováno v březnu 2010. Dostupné na:
<http://www.hologramsuppliers.com/digital-hologram.html>
- [8] HYPERPHYSICS. Holography. Citováno v lednu 2010. Dostupné na:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/optmod/holog.html>
- [9] GEORGIEV T., LUMISDANE A. *Theory and Methods of Lightfield Photography*. SPIE Electronic Imaging 2010. Citováno v dubnu 2010. Dostupné na:
<http://www.tgeorgiev.net/EI2010/>
- [10] OKANO F., ARAI J., KAWAKITA M. Depth range of a 3D image sampled by a lens array with the integral method. In *3DTV - CON 2009*. IEEE Catalog Number: CFP0955B. 2009. ISBN: 978-1-4244-4318-5.

Obrázky

1. Obrázky (1) a (4) až (7) - převzato z materiálů [9] a doplněno o české popisky
2. Obrázky (2) a (3) - oskenováno a doplněno o české popisky z materiálů [10]
3. Obrázky (8) a (9) - převzaty ze stránky
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Holografie>
4. Obrázek (10) - převzat ze stránky
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/optmod/holog.html>
5. Obrázek (11)- převzat ze stránky
<http://www.jrholocollection.com/collection/images/RHS/BoyGeorge.jpg>
6. Obrázek (12) - převzat ze stránky
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/c/c5/Hol.Thylacines.jpg>
7. Obrázek (13) - převzat ze stránky
<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
8. Obrázek (14) - převzat ze stránky
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/f2/Integral_roberts1.jpg
9. Obrázky (15) až (19) - vytvořeny z podkladů vlastní výroby