

University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitni 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Tisk digitálních hologramů

Technical report

Ivo Hanák, Martin Janda, Petr Lobaz

Technical Report No. DCSE/TR-2007-09
December, 2007

Distribution: public

Technical Report No. DCSE/TR-2007-09
December, 2007

Tisk digitálních hologramů

Ivo Hanák, Martin Janda, Petr Lobaz

Abstract

Optická ověření syntetického hologramu je významným nástrojem pro celkové ověření metody a to především v situacích, kde pro nasazení hologramu předpokládá lidský pozorovatel, což je také cíl našich metod. V této publikaci jsou shrnuty naše pokusy pro vytvoření mechanismu pro přenos syntetického hologramu na fyzické médium v prostředí ZČU.

This work has been partially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the research program LC-06008 (Center for Computer Graphics). This work has been partially supported by the EU project EU within FP6 under Grant 511568 with the acronym 3DTV

Copies of this report are available on
<http://www.kiv.zcu.cz/publications/>
or by surface mail on request sent to the following address:

University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitní 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Copyright (C) 2006 University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic

Authors hereby declare that this is their own work and all materials are properly cited.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Konvence a značení	2
2	Zkoumaná řešení	3
2.1	Použití laserové tiskárny	3
2.2	Použití osvitového zařízení	5
2.3	Použití fotografie	6
2.4	Ostatní neověřené postupy	8
3	Binarizace hologramu	10
3.1	Prahování	10
3.2	Půltónovnění	11
4	Závěr	16
A	Významné zdrojové texty	18

Kapitola 1

Úvod

Tento dokument shrnuje poznatky a výsledky pokusů, které se zabývali použitím běžně dostupných zařízení pro přenos digitálního hologramu na fyzický materiál a to včetně nutných úprav nutných pro úspěšné vytištění hologramu. Dokument předpokládá, že čtenář je seznámen s oblastí holografie.

1.1 Motivace

Naše metody [JHS06] a to včetně jeho rozšíření do plného paralaxu [JHS07] jsou určeny k syntéze hologramu a to libovolné velikosti. Oproti postupu uvedeného v [KZG07] je naším cílem použít holografii pro účely zobrazování, nikoliv pro účely zkvalitnění výstupů počítačové grafiky. Proto je náš postup upraven tak, že je možné generovat i hologramy, které svojí velikostí přesahují hranici dostupné paměti. V současnosti jsme schopni generovat hologramy, které velikostí přesahují schopnosti dostupných digitálních prostředků, tzv. spatial light modulators (SLM). Zatím co největší SLM jsou schopné zobrazit 1900×1200 vzorků, námi generované velikosti se pohybují kolem 4096×4096 .

Vzniká tedy problém ověření výsledku. Numericky můžeme naše výsledky ověřit a to i s omezením negativních vlastností diskretizace užitě při numerické simulaci. Nicméně tyto simulace nám nemohou spolehlivě ukázat skutečné chování rekonstruovaného útvaru s přihlédnutím k lidskému pozorovateli. Během simulace jsou totiž vzdálenost a další parametry, které mají vliv na zaostření, zadány jako vstup. Při pozorování výsledku lidským pozorovatelem však tyto parametry musí vypočítat mozek na základě obrazu promítaného na sítnici. Pokud nedostane odpovídající vstupy, nemůže zaostřit a tedy ani vidět útvar, který je obsažen v námi vytvořeném hologramu, byť numerická simulace jej zrekonstruovat dokázala.

Možným řešením by bylo počítat hologramy, které svojí velikostí vyhovují stávajícím SLM. Takové hologramy jsou poměrně malé a je tedy možné, že při syntéze mohlo dojít k problémům, které se projeví až u hologramů větších a s větším pozorovacím úhlem. Vzhledem k cíli naší snahy by ignorování těchto problémů mohlo mít za následek omezené nasazení metody pro fyzicky velké hologramy. V neposlední řadě, cena SLM je vzhledem ke své velikosti vysoká a proto jej není možné v prostředí ZČU zakoupit.

Na základě výše uvedených informací je možné formulovat požadavek na systém, který by umožnil optickou rekonstrukci námi vypočtených hologramů ve velikostech vyhovujících

našemu záměru. Pokud by tento systém existoval, mohli bychom opticky ověřit naše výpočty a mít tedy i důkaz korektnosti naší stávající a i všech budoucích metod. V neposlední řadě by tento systém umožnil představit a demonstrovat výhody našeho přístupu, resp. holografie, v porovnání s ostatními metodami zobrazování.

Systém, který splňuje požadavky, má dva základní prvky: vytvoření modulátoru světla (SLM) a vytvoření optického zázemí, které je diskutováno v technické zprávě [HJS07b].

1.2 Konvence a značení

Hologram je v pojetí tohoto dokumentu interferenční obrazec na rovině diskretizovaný pravidelnou, pravoúhlou mřížkou. Jedná se tedy o matici vzorků $H = [h_{ab}]$ a předpokládá se, že hodnoty všech vzorků jsou reálná čísla v rozsahu $[0, 1]$, tj. hologram je šedotónový. Rozteč vzorků h_{ab} je pro zjednodušení v obou směrech shodná a je rovna D . Pro účely rekonstrukce je hologram je centrován kolem počátku a pozorovatel se pohybuje podél osy Z .

Syntézou hologramu je míněn proces vytváření hologramu, během něhož je ze matematického popisu scény vypočteno optické pole námi vyvinutými metodami, viz [JHS07, HJS07a]. Po vypočtení je optického pole složeno s rovinnou vlnou a vzniklý interferenční obrazec je pak hologram. Pokud není uvedeno jinak, předpokládá se, že vzniklý hologram je off-axis hologram. Rekonstrukcí hologramu je pak míněna propagace v úhlovém spektru [Goo05] do vzdálenosti, ve které byly umístěny dané součásti scény.

Kapitola 2

Zkoumaná řešení

Tato kapitola obsahuje seznam zkoumaných prostředků a jejich zhodnocení. Kriterium pro výběr prostředku byla především jeho dostupnost v rámci zdrojů ZČU a zdrojů projektu LC-CPG.

2.1 Použití laserové tiskárny

Laserová tiskárna je jedním z nejdostupnějších zařízení. Rozlišení, které bývá zpravidla poskytováno je 1200 DPI. Uvedená hodnota činí teoretickou velikost bodu cca 21 μm . Tato velikost je větší, než běžně dostupná SLM (cca 8 – 12 μm). Důsledek tohoto rozdílu je zvětšení minimálních vzdáleností syntetické scény od hologramu a tedy redukce pozorovacího úhlu. Vzhledem k pořizovací ceně tiskového zařízení a nákladům na provoz je omezení přijatelné.

Zásadní nevýhodou použití laserové tiskárny je binární povaha zařízení, což znamená nutnou transformaci hologramu do vhodnější formy, viz kap. 3. Výhodou je pak absence nutnosti použít chemikálie pro získání výsledku, tj. vyvolání. Také doba obratu, tj. doba zpracování jednoho snímku, je velmi krátká, což napomáhá experimentální práci.

Pro ověření kvality byly provedeny testy. První sada testů spočívala v tisku difrakční mřížky. Cílem bylo ověřit, zda-li je možné použít plné rozlišení tiskárny. Aby bylo zajištěno, že obrazec difrakční mřížky nebude pozměněn rasterizérem tiskárny (RIP procesor) ve snaze o zkvalitnění vizuálního vjemu, byl vytvořen kód v programovacím jazyku PostScript, viz obj. A. Uvedený kód generuje čáry silné 1 tiskový bod na pozicích v celočíselných násobcích tiskových bodů. Celkově byly připraveny mřížky s roztečemi 1 až 6 tiskových bodů. Jako tiskový materiál pak byl použit materiál pro výrobu blán určených pro zpětné projekty.

Po vytištění byly mřížky ozářeny nerozšířeným paprskem laseru třídy II (1 mW) o vlnové délce 635 nm a byl pozorován výsledek, viz obr. 2.1. Po zhodnocení výsledku experimentu bylo konstatováno, že pro rozteč 1 tiskový bod byl vytištěn takřka jednolitý povrch, který propouští pouze velmi málo laserového záření. Na základě zjištění je možné předpokládat, že pro běžné laserové tiskárny není tvar a forma bodu definována dostatečně precizně. Činitelem přesnosti je pak metoda přenosu pigmentu na tiskové médium, kdy je pigment přenášen pomocí selenového válce. Toto zjištění pak také vedlo k použití 600 DPI tisku namísto 1200 DPI.



Obrázek 2.1: Příklad následku aplikace tištěné optické mřížky na paprsek laseru.

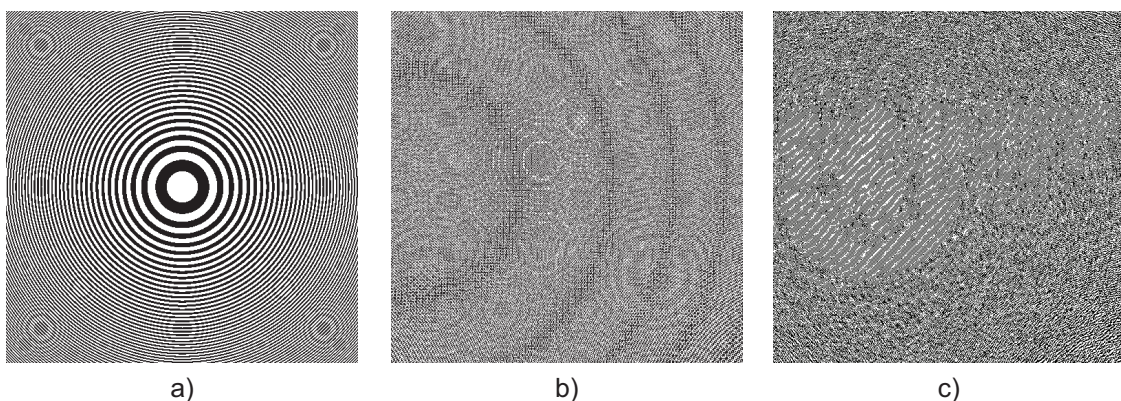
S uvedenými poznatky byla také provedena druhá sada testů. Během této sady byly vytvořeny jednoduché hologramy, vytištěny a opticky rekonstruovány. Na základě velikosti bodu pro 600 DPI tisk, tj. $42 \mu\text{m}$, a při použití difrakční podmínky [BW05]

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2D}, \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová délka a D je velikost bodu, je určen úhel θ , který je maximálním úhlem vychýlení paprsku pro nejmenší tisknutelnou mřížku. Při předpokladu velikosti testovacího hologramu 512×512 vzorků, tj. $21 \times 21 \text{ mm}$, je nejmenší nutná vzdálenost 2,9 m. Objekty bližší mohou být zatíženy chybou vlivem aliasingu. Dále při použití off-axis verze hologramu je nutné dodržet tuto vzdálenost, aby se předešlo překrytí jednotlivých součástí rekonstruovaného obrazu. Pro tuto vzdálenost byly numericky vytvořeny hologramy:

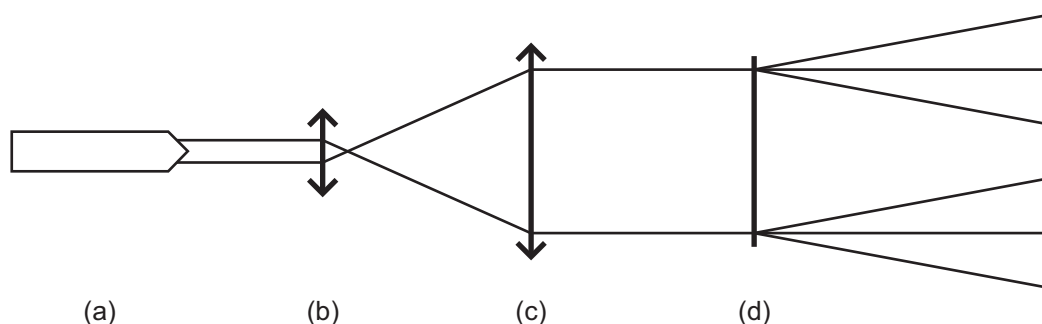
1. in-line hologram bodu,
2. hologram 4 bodů v různých hloubkách,
3. hologram kontrastního obrazu.

Všechny uvedené hologramy byly vytvořeny s použitím zdrojového modelu, který předpokládá, že body ve scéně jsou bodovými zdroji, které nemohou být ovlivněny svým okolím. Pro výpočet hologramu pak bylo použito Railegh-Sommefeld řešení a propagace v úhlovém spektru [Goo05]. Vytvořené šedotónové hologramy byly binarizovány prahem, viz kap. 3. Výsledné binární hologramy, viz obr. 2.1, byly přeloženy do podoby kódu v jazyce PostScript, aby se předešlo poškození vlivem manipulace s obrázkem, viz obr. A.



Obrázek 2.2: Hologramy po provedení binarizace, in-line hologram 1 bodu, hologram 4 bodů v různých vzdálenostech a hologram kontrastního obrázku.

Vytištěné hologramy se ozářily rozšířeným svazkem paprsků na sestavě obr. 2.1 a v dané vzdálenosti, cca 2,9 m, bylo vloženo stínítko, na které se promítl výsledek. Při pozorování byl detekován bod (viz hologram č. 1), více bodů v různých hloubkách (viz hologram č. 2) a i zaznamenaný obrazec. Na základě těchto pozorování je možné konstatovat, že laserová tiskárna může být použita pro přenos binární formy hologramu na fyzické médium. Nicméně vzhledem k velikosti bodu je nutná minimální vzdálenost pro záznam bez vlivu aliasingu příliš velká pro praktické nasazení v laboratoři. Také fyzická velikost tisku pro hologramy o počtu vzorků 4096×4096 , tj. 173 mm, je problémem, neboť stávající vybavení optické laboratoře [HJS07b] je schopno schopnosti rozšířit svazek paprsků na svazek rovnoběžných paprsků o maximálním průměru 50 mm.



Obrázek 2.3: Sestava užitá pro rekonstrukci hologramu, která obsahuje zdroj laserového záření (a), mikroskopický objektiv (b), velkou čočku (c) a hologramu (d).

2.2 Použití osvitového zařízení

Zásadním nedostatkem nasazení laserové tiskárny je nízké rozlišení v kombinaci s nedostatečně definovaným tvarem bodu. Tedy je nutné nalézt zařazení podobné laserové tiskárně, ale s vyšším rozlišením. Jako velmi dostupné zařízení s vyšším rozlišením je osvitový stroj (image setter) užívaný pro přípravu předloh k offsetovému tisku. Toto zařízení je schopné tisknout s rozlišením až 3600 DPI, tj. bod je velký $7.06\mu\text{m}$.

Osvitový stroj je užíván pro přípravu předloh pro profesionální tiskové stroje, lze tedy předpokládat, že bod bude lépe definován, než v případě laserové tiskárny. Předpoklad je také podpořen fyzickou konstrukcí osvitového zařízení, kde bod je vytvořen ozářením laserovým paprskem, kdežto bod v laserové tiskárně vzniká přenosem pigmentu v podobě prášku přes selenový válec na médium. Také lze předpokládat, že RIP běžného osvitového zařízení nebude zasahovat do předaných binárních obrazů. Dále pak materiály pro offsetový tisk mají podobu průhledných fólií, do kterých je vykreslen daný obrazec, což poskytuje výsledek podobný tisku na průhledné blány v případě laserové tiskárny. Dále pak skutečnost, že zařízení je masově rozšířeno, vede k nižší ceně za hologram, než by tomu bylo při užití specializovaného stroje.

Pro otestování vhodnosti osvitového stroje byly vyrobeny, podobně jako u laserové tiskárny, mřížky. Pro zjednodušení a snížení nákladů byla vytvořena pouze mřížka s čárami vzdálenými o jediný tiskový bod zařízení. Vypočtená mřížka byla zaznamenaná do bitmapy a vysvícena na osvitovém zařízení. Výsledek osvitu byl pak ozářen nerozšířeným svazkem paprsků laserového záření a byl pozorován efekt difrakce paprsku, viz obr. 2.2. Na základě

úspěchu tohoto testu bylo konstatováno, že předpokládaná kvalita definice jednoho bodu se potvrdila a je tedy možné použít plného rozlišení, tj. 3600 DPI.



Obrázek 2.4: Výsledek difrakce nerozšířeného paprsku laseru na difrakční mřížce vytvořené na osvitovém zařízení.

Na základě poznatků z předchozího pokusu a difrakční podmínky v rovnici (2.1) byla stanovena nejmenší vzdálenost, která je možná ještě bezpečně zaznamenat. Pro účely dalšího testu jsme vytvořili hologramy o velikosti 2048, což při velikosti bodu $7,06 \mu\text{m}$ znamená minimální vzdálenost 0,32 m. Vytvořeny byly hologramy:

1. hologram bodu,
2. hologram binárního obrazce.

Binarizované a vysvícené formy výše uvedených hologramů byly otestovány s využitím stejné sestavy jako v případě laserové tiskárny, viz obr 2.1. V daných vzdálenostech dle předpokladu pak vznikly rekonstrukce zapsaných obrazců.

Na základě pozorování experimentu jsme konstatovali, že osvitové zařízení poskytuje podobný výstup jako v případě laserové tiskárny. Narozdíl od laserové tiskárny je bod osvitového zařízení přesněji definován a tisk je standardně prováděn na průhlednou fólii. Cena tisku je sice vyšší, než v případě laserové tiskárny, ale stále výrazně nižší, než v případě specializovaných strojů. Nevýhodou osvitového zařízení je pak doba obrátky, kdy je nutné vysvícení dat provést v externí firmě, a požadavek provést vysvícení více hologramů zároveň pro redukci výsledné ceny.

2.3 Použití fotografie

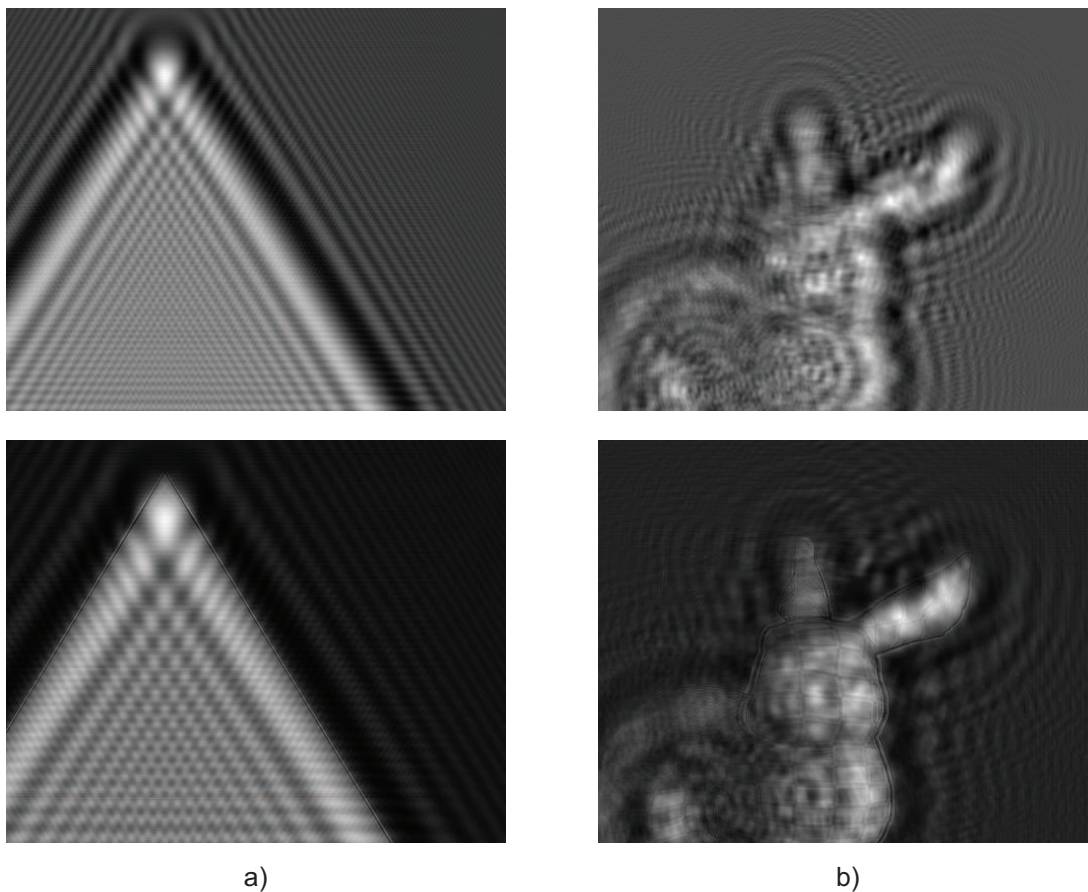
Významnou limitující vlastností jak u laserové tiskárny, tak u osvitového zařízení je skutečnost, že oba přístup poskytují pouze binární výstup. V praxi to pak znamená, že nejdříve je nutné provést binarizaci hologramu, což vede ke ztrátě informace, a výsledek poté vytisknout. Na základě skutečnosti, že snahy o použití binárního zařízení pro účely holografie byly prováděny již v minulosti [Mac97], byly vytvořeny postupy, které s omezením binarizací počítají a snaží se důsledek binarizace eliminovat. Nicméně metody zaměřující se na eliminaci negativního vlivu binarizace vedou k snížení rozlišení, což má za následek zvětšení minimálních vzdáleností, viz rovnice (2.1).

Naproti tomu pokud je pro zpracování natištěného binárního hologramu použita optická cesta a fotografický materiál, je možné pořídit zmenšeninu. Pokud je součástí cílové zmenšeniny útvar menší, než 0,01 mm, pak je vlivem nepřesnosti rozmazán. V případě, že tento útvar bude velikosti srovnatelné s hraniční velikostí, tj. 0,01 mm, a bude složen z poměru bílých a černých bodů, pak lze předpokládat, že vlivem rozmazání vznikne šed' odpovídající danému poměru.

Na základě této úvahy byl proveden test využívající zmenšení optickou cestou. Vstupem testu byly dva šedotónové hologramy, viz obr. 2.3:

1. in-line hologram trojúhelníka na rovině rovnoběžné s hologramem,
2. in-line hologram syntetického objektu "Králík".

Oba hologramy byly vypočteny námi vyvinutou metodou [[HJS07a]] a převedeny na matici černobílých bodů metodou půltónování (half-toning), kdy je jeden bod nahrazen binární maticí bodů o daném poměru. Velikost matice a míra zmenšení byla volena tak, aby se po zmenšení matice promítla do bodu o velikosti 0,01 mm. Poté se vzniklý binární obraz vysvítal na osvitovém zařízení, které poskytuje dostatečnou kvalitu a rozlišení výstupu, a byl přenesen a opticky zmenšen kvalitním středoformátovým fotoaparátem od společnosti Sinar. Po vyvolání optického materiálu se výsledek otestoval s využitím sestavy z obr. 2.1. Vlastní optický přenos byl vzhledem k ceně fotoaparátu proveden u odborníka.



Obrázek 2.5: In-line hologramy (nahore) před provedením rozkladu na binární vyjádření úrovní šedi včetně numerických rekonstrukcí (dole) objektu trojúhelník (a) a králík (b).

Zásadním problémem tohoto přístupu bylo nalezení vhodné doby expozice tak, aby výsledek obsahoval dostatečný kontrast mezi světlou a tmavou částí hologramu. I přes pokusy z různou dobou expozice nebyl nalezen vhodný čas, který by zajistil dostatečný kontrast. Také se ukázalo, že užití běžného fotomateriálu se jeví jako nepříliš vhodné a to především vlivem šumu, který vkládá do procházejícího paprsku. V neposlední řadě byly také vytvořeny negativy namísto pozitivů, což snižuje kvalitu rekonstrukce.

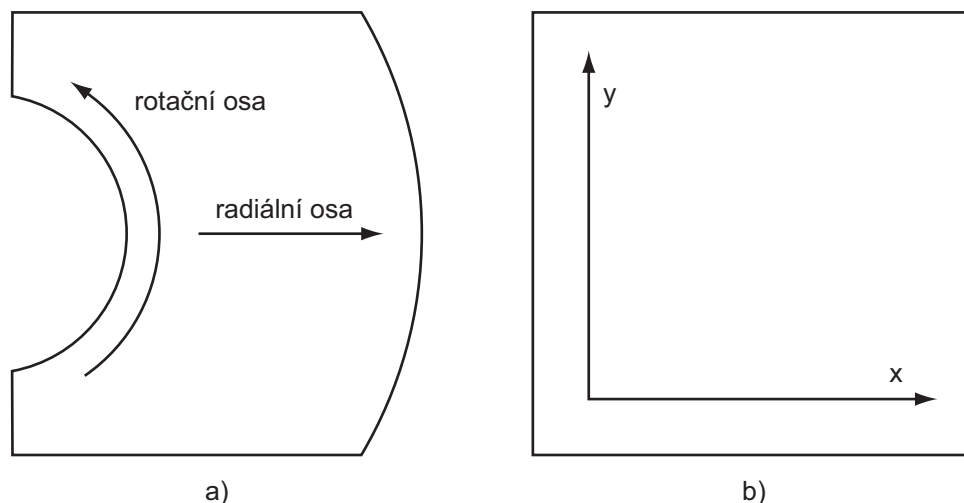
Proces s využitím fotografie je náročnější a to především po stránce časové. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně kvalitního objektivu je nutné využívat služeb externí firmy, což dále zvyšuje náklady. Na druhou stranu je tento postup zřejmě jediný, který lze dosáhnout malého šedotónového bodu, což zkvalitňuje výslednou rekonstrukci v porovnání s binárním hologramem, viz kap. 3.

2.4 Ostatní neověřené postupy

Kromě výše zmíněných postupů, které se prakticky vyzkoušely, byly při studiu literatury nalezeny i postupy až exotické, založené na jiných technologiích. Pokud se vynechají postupy využívající tisku vhodného vzoru a následného optického zmenšení [Har96], zbývají pouze experimenty s netradičním využitím obvyklých periférií počítače. Pro úplnost dokumentu jsou zde uvedeny příklady možných řešení.

Jedním z přístupů je využití zápisu na CD-R disk [SMU04]. Při zápisu na CD-R je totiž možné dosáhnout bodu o velikosti $1,5 \mu\text{m}$, což jednoznačně zvětšuje pohledový úhel, byť zápis je pouze binární. Zápis na CD-R probíhá tak, že zápisová hlava vypaluje otvory v materiálu podél drážky, které mají tvar buď soustředných kruhů nebo spirály. Efektivita difrakce disku je pak odhadnuta na 0,5 % a to především vlivem existence drážky a širšího rozsahu odrazivosti zapsaného záznamu.

Na základě organizace struktury na disku je nutné uspořádat hologram tak, aby jedna z os byla kruhová, druhá pak radiální, viz obr. 2.4. Zásadním problémem, na který je nutné brát ohled, je nepřesnost vystavení zápisové hlavy podél drážky a to i v případě zařízení s konstantní úhlovou rychlostí (CAV). Velikost chyby, které se zápisová hlava dopouští je v publikaci [SMU04] odhadnuta na $10 \mu\text{m}$. Pokud je radiální směr ztotožněn s původní osou X, pak redukce vlivu chyby vystavení hlavy vyžaduje výšku řádku větší, než chyba, které se může zápisová hlava dopustit.



Obrázek 2.6: Uspořádání osa hologramu na CD-R disku (a) v porovnání s běžným hologramem (b).

Výhoda použití CD-R jako zápisového média pro hologramy jsou především nízké náklady a vyšší rychlost obrátky. Struktura CD-R disku a nepřesnost vystavení zápisové hlavy pak způsobuje snížení kvality rekonstruovaného obrazu. Dále pak vlivem velikosti

záznamového media je i velikost hologramu omezena na 6×12 cm. Zásadní nevýhodou je však nutnost úpravy zápisového firmware zařízení tak, aby umožnilo zapsat binární obraz v požadovaném rozlišení bez vkládání dalších informací. Na základě nutnosti přeprogramovat firmware je širší nasazení této metody velmi ztíženo.

Další z možností je vytvoření zápisového zařízení podobného jedno-jehličkové tiskárně [MKM06]. Na otočný válec je připevněn světlocitlivý materiál, který je exponován zaostřeným svazkem laserových paprsků. Pohyb ve směru osy X hologramu je zajišťován otáčením válce, pohyb ve směru osy Y hologram pak vychylováním čočky pro zaostření paprsku. Vzdálenost ostřicí čočky od zápisového válce je taktéž regulována mikroposuny, aby se zajistila podobná velikost bodu i pro větší vychýlení ostřicí čočky. Svazek paprsků laseru je dále modulován tak, aby bylo možné dosáhnout rozdílných úrovní šedi.

Zápisový stroj umožňuje zápis šedotónového hologramu s velikostí bodu cca $1 \mu\text{m}$. Autoři uvádí rozlišení až 17000×8500 DPI. Vlivem mechanických nepřesností rychlosti otáčení válce mohou pro větší množství bodů v ose X hologramu vzniknout rozdílné fyzické délky řádků, které pak vedou k zvýšení šumu v rekonstrukci. I přes tuto nevýhodu je zařízení schopno tisknout hologram až o velikostech 32768×16384 vzorků s velmi dobrou kvalitou rekonstrukce. Vzhledem ke své experimentální povaze a náročnosti na kvalitu mechanického zpracování dílů je výroba podobného zařízení v prostředí ZČU neuskutečnitelná.

Kapitola 3

Binarizace hologramu

Zařízení, která umožňují vysoké rozlišení, jsou zpravidla binární. Toto omezení zjednodušuje konstrukci zařízení a umožňuje tak dosáhnout levněji vyšších rozlišení. Tímto vniká požadavek na převod hologramu do binární formy. Základní postupy vytvořené v 60. letech byly založeny na náhradě vzorku h_{ab} hologramu maticí $M_{ab} = [m_{op}^{ab}]$, $m_{op}^{ab} \in \{0, 1\}$ [Har96, Tri87]. Vzniklá binární forma pak byla vytištěna a opticky zmenšena na fotocitlivý materiál. Pokud bylo v součinnosti s uspořádáním bílých a černých bodů v matici M_{ab} zvoleno i vhodné rekonstrukční záření výsledek rekonstrukce pak byl takřka ekvivalentní situaci, která by nastala při užití nikoliv binární formy hologramu.

Díky tomu, že matice M_{ab} vybírá pouze vhodnou malou část rekonstrukčního záření dopadající na celý povrch vymezený maticí, dochází k významným energetickým ztrátám v porovnání se situací, když je použit šedotónový hologram. Další nevýhodou těchto postupů je nutnost fotografické cesty a především snížení rozlišení, neboť každý h_{ab} je nahrazen maticí bodů. Vzhledem k omezeným prostředkům bylo naším cílem vyzkoušet postupy, které nevyžadují náročnou fotografickou cestu či podobné konstrukce.

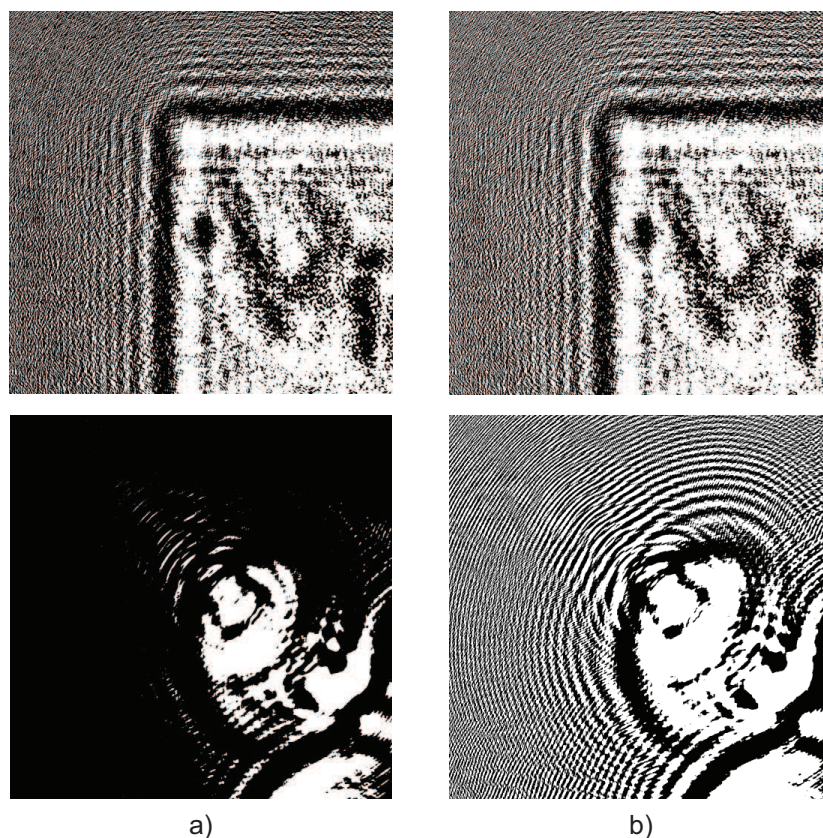
3.1 Prahování

Prahování je nejjednodušší způsob převodu šedotónového hologramu na binární. Pokud bude ve výsledném hologramu zachována vhodná struktura, bude i takto binarizovaný hologram poskytovat rekonstrukci. Problémem je tedy volba prahu. Pokud je práh zvolen nevhodně, struktura zaniká, viz obr. 3.1a.

Během experimentů se použití univerzální hodnoty prahu ukázalo jako naprosto nevhodné, viz obr. 3.1. Ačkoliv zvolený práh neznamenal ztrátu struktury pro jeden z hologramů, v případě druhého již byla viditelná ztráta struktur použitých při difrakci, viz obr. 3.1a dole.

Dále byly vyloučeny i techniky založené na univerzální určení hodnoty prahu a distribuce kvantizační chyby do okolních pixelů, např. Floyd-Steinberg dithering. Na principu takovýchto metod lze předpokládat, že do výsledku bude jednak zanesen šum, ale hlavně se poruší požadovaná struktura. Příčinou tohoto chování je skutečnost, že tyto metody jsou určeny především pro lidského pozorovatele, pro kterého je příjemnější šum, než-li ostrá hranice.

Daleko vhodnější se ukázalo použití adaptivního prahu založeného na předpokladu, že



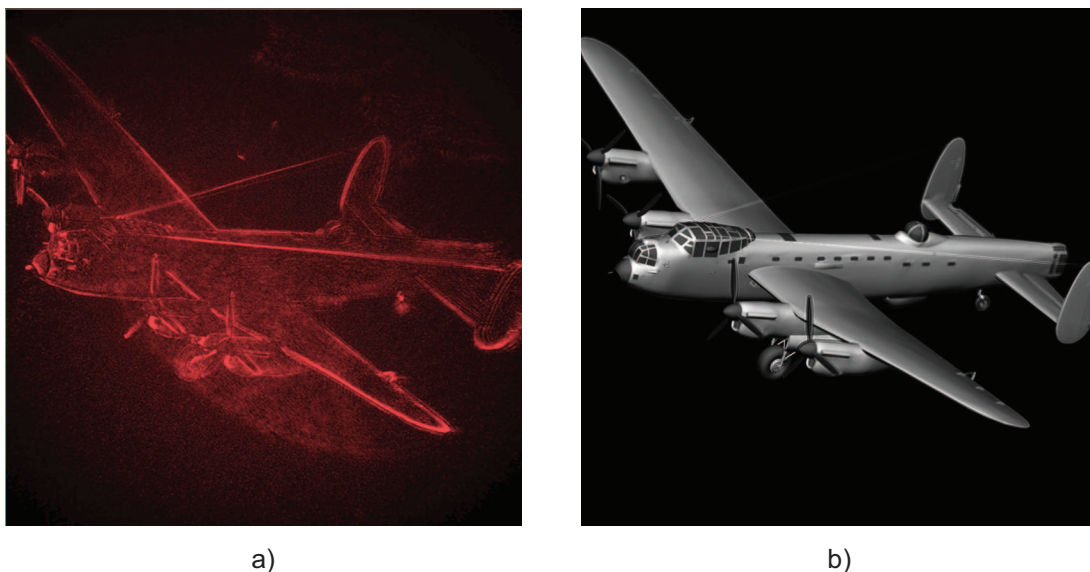
Obrázek 3.1: Detail dvou in-line hologramů binarizovaných volbou univerzálního prahu 30 % pro oba hologramy (a) a volbou prahu poplatného pouze danému hologramu (b).

bude-li zastoupení rozsvícených a zhasnutých bodů přibližně stejné, pak lze předpokládat, že ve výsledku bude viditelná i struktura, jenž je stěžejní pro rekonstrukci. Výhodou tohoto přístupu je schopnost zpracovat velmi rozdílné hologramy. Pro ověření předpokladu byly provedeny experimenty a to včetně optického ověření s využitím osvitového zařízení, viz obr. 3.1.

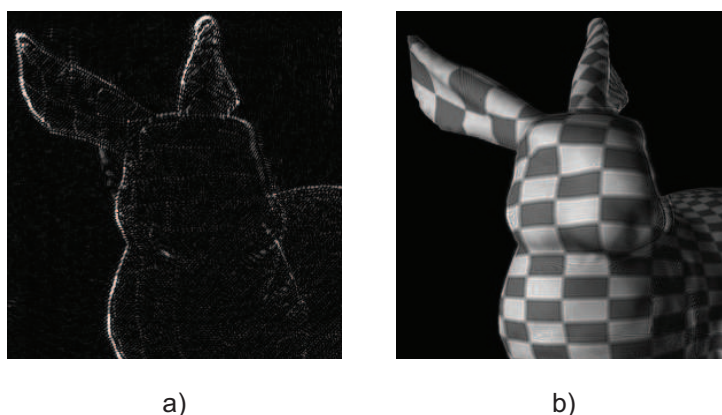
V průběhu experimentů bylo zjištěno, že binarizace hologramu má výrazně záporný vliv na kvalitu výstupu, viz obr. 3.1a. Výsledek připomíná aplikaci filtru s propustností vyšších frekvencí, ačkoliv jím není. Zatímco hrany a rozhraní rozdílných intenzit na povrchu plochy, je po rekonstrukci zachováno, plochy a to především části, které se mění pouze pozvolna, jsou ztraceny zcela, viz obr. 3.1.

3.2 Půltónovnění

Pokud je hologram amplitudový modulátor, pak to znamená, že každý bod šedotónového hologram snižuje amplitudu části záření. Pokud se sníží množství úrovní šedi a hranice mezi šedmi jsou rovnoměrně rozloženy, pak je sice změna či spíše degradace rekonstrukce znatelná, viz obr. 3.2b, nicméně v porovnání s binarizovanou formou, viz obr. 3.2, jsou plochy stále rozpoznatelné. Tedy pokud by se sestrojila oblast taková, že požadovaný poměr mezi energií dopadající na povrch oblasti a energií, která oblastí projde a opustí ji,



Obrázek 3.2: Optická rekonstrukcí hologramu binarizovaného adaptivní volbou prahu (a) v porovnání s numerickou rekonstrukcí z optického pole (b) jako nejkvalitnějším výstupem.

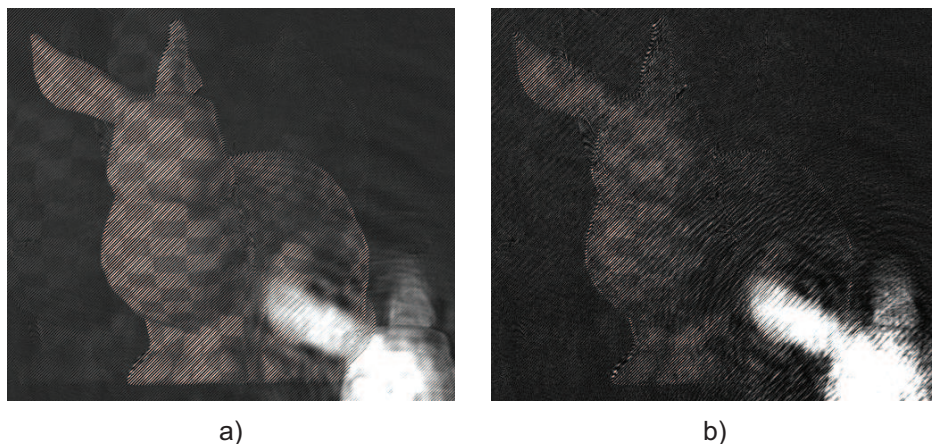


Obrázek 3.3: Detail numerické rekonstrukce binarizovaného hologramu (a) a numerické rekonstrukce z optického pole (b). Povšimněte si zachování hrany mezi světlou a tmavou částí textury šachovnice na uchu králíka.

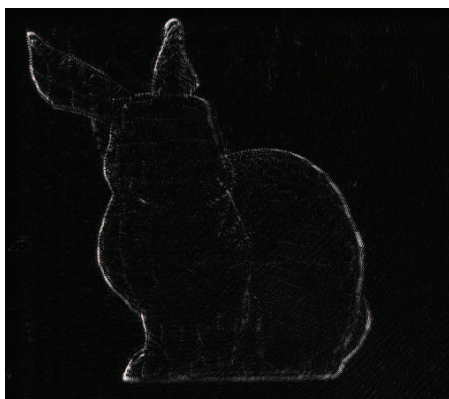
pak lze předpokládat, že bude dosaženo rekonstrukce podobné rekonstrukci z šedotónového obrazu s redukovaným množstvím úrovní šedi.

Analogii k popisovanému stavu lze nalézt v tiskařském průmyslu, kde jsou taktéž k dispozici pouze binární tiskové stroje s vyšším rozlišením. Pokud je nutné na takovémto stroji vyjádřit šedý bod, pak je možné použít metodu půltónování (half-toning), kde je bod nahrazen maticí složenou z bílých a černých bodů. Fyzická velikost matice je shodná nebo alespoň podobná velikosti požadovaného výsledného bodu. Na základě principu metody půltónování byly provedeny pokusy a konstatováno, že tento přístup v základní podobě není vhodný pro účely holografie.

Pokud máme vzorek h_{ab} v bodu nahrazen maticí malých $M_{ab} = [m_o^{ab}p]$ a pokud se vezmou v potaz pouze body o souřadnici $o = o_c$ a $p = p_c$ a zbytek binárního hologramu je zastíněn, pak vzniká difrakční struktura. Rozložením světlých bodů se tato struktura



Obrázek 3.4: Numerická rekonstrukce z šedotónového hologramu s 256 úrovněmi šedi (a), šedotónového hologramu se 4 úrovněmi šedi (b).



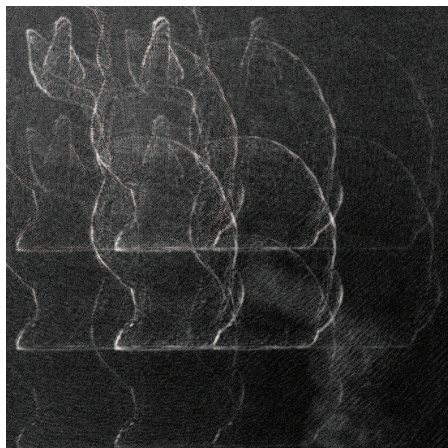
Obrázek 3.5: Numerická rekonstrukce z binárního hologramu vytvořeného aplikací prahu.

podobá hologramu binarizovaného prahováním. Rekonstrukcí této struktury, pak vznikne obraz podobný rekonstrukci binárního hologramu, pouze posunutý. Zvolí-li se jiná dvojice (o_c, p_c) , pak opět vznikne rekonstrukce, která je však posunutá. Superpozicí jednotlivých rekonstrukcí se pak vytvoří výsledek interakce hologramu binarizovaného pŕltónováním s rekonstrukčním svazkem paprsků, tj. kolem požadovaného místa rekonstrukce pak vznikají falešné rekonstrukce, viz obr. 3.2.

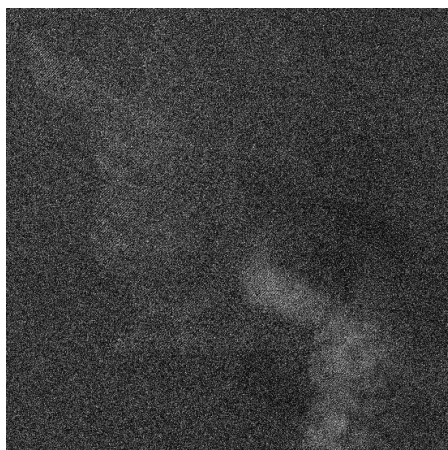
Jako viník uvedeného chování byla označena pravidelnost vzoru. Pokud je k dispozici neměnná knihovna matic M_{ab} , která pro danou úroveň šedi přiřadí pokaždé stejnou matici M_{ab} , pak na výběrem pouze jednoho bodu matice M_{ab} a zakrytím ostatních bodů vznikají vzory, jenž jsou podobné hologramu binarizovaného prahováním. Tedy poruší-li se tato pravidelnost, pak je zde předpoklad, že falešné rekonstrukce budou rozbity a stanou se tak součástí šumu pozadí.

Pro ověření tohoto předpokladu byl proveden test, při kterém se pro každý prvek generovala náhodná matice M_{ab} s žádaným zastoupením bílých a černých bodů. Aby bylo dosaženo větší variability matice M_{ab} pro jednu úroveň šedi, byl šedotónový hologram kvantizován na 4 úrovně šedi. Kvantizovaný hologram se binarizoval pŕltónováním a výsledek byl numericky rekonstruován, viz obr. 3.2.

Ve výsledku rekonstrukce nejsou patrné žádné násobné, falešné rekonstrukce jako v



Obrázek 3.6: Numerická rekonstrukce hologramu binarizovaného přímým použitím metody pŕltónování s maticí o rozměrech 4×4 bodů.

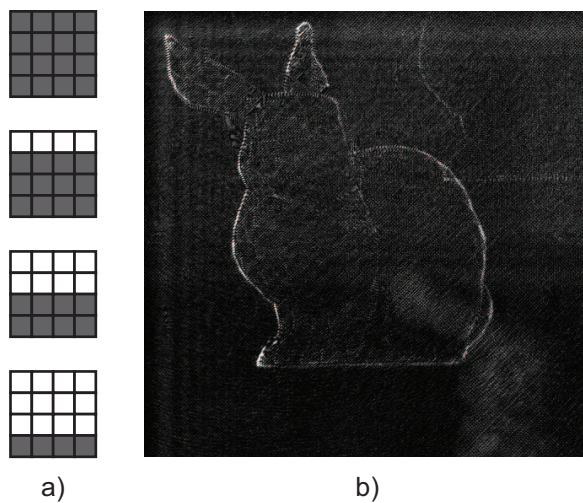


Obrázek 3.7: Numerická rekonstrukce hologramu binarizovaného metody pŕltónování s náhodnou maticí o rozměrech 4×4 bodů.

předchozím případě. Zároveň je však požadovaná rekonstrukce velmi obtížně rozpoznatelná. Pokud se porovná obr. 3.2 s obr. 3.2b, pak lze konstatovat, že oba výsledky jsou si podobné. Narozdíl od obr. 3.2 jsou místa s pozvolnou změnou intenzity stále patrné. Šum vzniklý rozbitím falešných rekonstrukcí je svojí intenzitou velmi podobný požadované rekonstrukci. Tedy není možné použití náhodné matice pro optickou rekonstrukci, neboť při optickém nasazení je výsledek dále negativně ovlivněn šumem v důsledku nečistot ať již nečistot fyzických na optických prvcích či nečistot v úhlovém spektru svazku paprsku.

Pozorovaný výsledek pokusu tedy je, že přidání prvku náhody do matice M_{ab} se provedlo rozbít falešné rekonstrukci a vznikly ucelené plochy. Zároveň však vedlo vložení náhodného činitele k zvýšení šumu. Otázkou však je, zda-li je vytváření zcela náhodné matice M_{ab} nutností či zda-li by nebylo možné si vystačit pouze s několika variacemi M_{ab} , tj. nahradit náhodu při aplikaci matice omezenou pseudonáhodností. Pro zodpovězení této otázky byl učiněn pokus s šedotónovým hologramem kvantizovaným na 4 úrovně šedi. Při binarizaci tohoto hologramu byla sice použita pevná sada matic M_{ab} , viz obr. 3.2a, ale během vlastní aplikace matice M_{ab} rotována podél své osy Y o $r_{ab} = (a \otimes 3) \oslash (b \otimes 3)$, kde

operátor $\otimes$ je bitový součin a operátor $\oplus$ je exkluzivní součet. Vzniklý binární hologram byl opět numericky rekonstruován, viz obr. 3.2.



Obrázek 3.8: Užitá sada matic M_{ab} (a) a rekonstrukce s využitím drobné variace matic (b).

Výsledek pokusu na obr. 3.2b je podobný situaci na obr. 3.2. Nežádoucí rekonstrukce jsou sice slabší, než v případě pevné sady matic bez variace, ale stále nesplývají s pozadím. Náznaky ploch jsou výraznější, než je tomu u pevné sady matic bez variace, ale nikoliv dostatečně výrazné. Závěr je tedy je, že nahrazení náhody variacemi, resp. pseudonáhodnostní, vede k pozitivní změně, ale tato změna není dostatečná.

Kapitola 4

Závěr

Zařízení schopná binárního výstupu poskytují vysoké rozlišení, které je aplikovatelné pro účely přenosu digitálního hologramu na fyzické médium. Pokud je zařízení založené na použití laseru pro přímý zápis na fyzické, lze očekávat, že bod bude dostatečně dobře definován, aby bylo možné použít plného rozlišení. Vlivem skutečnosti, že většina zařízení je rozšířena v průmyslové praxi je cena na jeden tisk nižší a celková dostupnost vyšší, než u specializovaných prototypů.

Zásadní omezením zařízení je binární výstup. Použití binarizace prahováním bez adaptivního prahu nevede k použitelnému výsledku, neboť univerzální práh nelze stanovit. V případě adaptivního prahu lze již binarizovat libovolné hologramy, ale vlivem absence ploch v rekonstrukci je praktické použití diskutabilní. Přímé nasazení pultónování pro účely binarizace hologramu je nevhodné, neboť se vlivem pravidelnosti ve vzorku objevují rušivé rekonstrukce. Avšak pokud se zavede prvek náhodnosti do pultónování, pak lze dosáhnout výsledku podobnému šedotónovému obrazu kvantizovanému na nižší počet úrovní. Očekávaným vedlejším efektem zavedení prvku náhody do pultónování je zvýšení množství šumu v rekonstrukci, což má negativní dopad na rozpoznatelnost rekonstrukce.

Lze tedy zatím říci, že zatím nebyl nalezen vhodný prostředek pro tisk digitálních hologramů. Naštěstí jsme ještě nevyčerpaly všechny možnosti a do budoucna budeme v této aktivitě pokračovat.

Literatura

- [BW05] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 7th edition, 2005.
- [Goo05] J.W Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts & Company Publishers, 3rd edition, 2005.
- [Har96] P. Hariharan. *Optical Holography: Principles, techniques and applications*. Cambridge University Press, 2nd edition, 1996.
- [HJS07a] I. Hanák, M. Janda, and V. Skala. Full-parallax hologram synthesis of triangular meshes using a graphical processing unit. In *3DTV Conference proc.*, pages ?–?, 2007.
- [HJS07b] I. Hanák, M. Janda, and V. Skala. Optická laboratoř. Technical Report DCSE/TR-2007-10, University of West Bohemia, 2007.
- [JHS06] M. Janda, I. Hanák, and V. Skala. Digital HPO hologram rendering pipeline. In *EG2006 short papers conf. proc.*, pages 81–84, 2006.
- [JHS07] M. Janda, I. Hanák, and V. Skala. Hpo hologram synthesis for full-parallax reconstruction setup. In *3DTV Conference proc.*, pages ?–?, 2007.
- [KZG07] P. Kaufmann, M-R. Ziegler, and M. Gross. A framework for holographic scene representation and image synthesis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(2):403–415, 2007.
- [Mac97] A.E Macgregor. Computer generated holograms from dot matrix and laser printers. *Am. J. Phys.*, 60(9):839–846, 1997.
- [MKM06] K. Matsushima, S. Kobayashi, and H. Miyauchi. A high-resolution fringe printer for studying synthetic holograms. In *Practical Holography XX*, volume 6136, pages 347–354. SPIE, 2006.
- [SMU04] Y. Sakamoto, M. Morishima, and A. Usui. Computer generated holograms on a cr-r disk. *Practical Holography XVIII*, 5290:42–49, 2004.
- [Tri87] G. Tricoles. Computer generated holograms: An historical review. *Appl. Opt.*, 26(20):4351–4360, 1987.

Dodatek A

Významné zdrojové texty

```
%!PS-Adobe-2.0
/buff 128 string def
0.12 0.12 scale % make 600 DPI dot
%%EndProlog

% Start of loop
1 setlinewidth
400
{
    dup
    2400 gt { exit } if

    dup
    400
    moveto
    0 2000 rlineto
    stroke

    2 add
} loop

showpage
%% EOF
```

Obrázek A.1: Zdrojový text v jazyce PostScript pro vytvoření mřížky o rozteči 1 tiskový bod na laserové tiskárně o rozlišení 600 DPI.


```

%!PS-Adobe-2.0
/buff 128 string def
/RNumber {currentfile buff readline
  pop
  cvr} def
0.06 0.06 scale % 1200DPI dot
%%EndProlog

% Start of loop
1 setlinewidth
{
  RNumber
  dup
  0 lt { exit } if
  {
    dup % make move to
    RNumber
    dup % check ending condition
    0 lt {
      pop %remove number
      exit } if
    2
    RNumber
    rectfill
  } loop
  pop %remove number of line
} loop
400 % line Y-position number
400 % line segment start
400 % line segment length
1000
200
-1 % end of line
402
800
400
1000
200
-1
-2 % end of pattern
showpage
%% EOF

```

Obrázek A.2: Zdrojový text v jazyce PostScript pro zápis binárního hologramu po řádkách, kde řádka je tvořena souvislými segmenty bodů. Uvedený zdrojový text předpokládá 600 DPI.