



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Možnosti přispění moderních 3D zobrazovacích metod k zachování kulturního dědictví lidstva

RNDR. HYNEK SEKANINA, PH.D.

ING. JAROSLAV ZEMAN

BC. MIROSLAV ZEMAN

*Ústav fyziky
Filozoficko-přírodovědecké fakulty
Slezské univerzity v Opavě
Bezručovo nám. 13
746 01 Opava, Česká republika*

Tento text byl vytvořen jako studijní opora v rámci projektu
registrační číslo CZ.1.07/2.2.00/28.0014

Opava, 2013 - 2015

Obsah

A. Poděkování a prohlášení	iii
B. Cíle kurzu	v
1 Historický úvod do oboru	1
1.1 Úvodní poznámky	1
1.2 Úvodní poznámky k moderním 3D holografickým metodám . .	2
1.3 Úvodní poznámky ke stereoskopickým 3D metodám	3
2 Význam ochrany kulturního dědictví	5
3 Holografické metody vzniku, záznamu a rekonstrukce 3D obrazu. Vlastnosti obrazu.	9
3.1 Obecné principy zobrazení, zrod holografie.	9
3.2 Záznam hologramu	11
3.3 Rekonstrukce hologramu	13
3.4 Specifické rysy digitální holografie	15
3.4.1 Možnosti záznamu	16
3.4.2 Možnosti rekonstrukce	18
4 Principy 3D holografické interferometrie	21
4.1 Holografická interferometrie v reálném čase	22
4.2 Holografická interferometrie metodou dvojí expozice	24
4.3 Sendvič holografie	25
4.4 Specifické rysy digitální holografické interferometrie	26
4.5 Interpretace interferogramu v klasické holografické interferometrii	27
4.6 Přímé určení intenzity a fáze v digitální holografické interferometrii	30

5	Interfometrie při ochraně uměleckých děl	35
5.1	Holografická interferometrie při ochraně uměleckých děl	35
5.2	Principy elektronické speckle interferometrie	38
5.2.1	Geometrie v ESPI	42
5.2.2	ESPI v 3D diagnostice uměleckých předmětů	47
6	Stereoskopické metody vzniku, záznamu a sledování 3D obrazu	51
6.1	Binokulární vidění – základ prostorového vnímání	51
6.2	Optické principy stereoskopie	53
6.3	Stručná historie stereoskopie	55
6.4	Základní stereoskopické metody	58
6.4.1	Pasivní technologie	59
6.4.2	Aktivní technologie	61
6.4.3	Bezbrýlové technologie	62
7	Spektroskopie při dokumentaci uměleckých děl v praxi	65
7.1	Použitá stereoskopická technika a software	65
7.2	3D dokument starobylé Paestum	66
7.3	3D dokument starobylé Pompeje	67
8	Závěr	69

A. Poděkování a prohlášení

Autoři vyjadřují svou vděčnost všem, kteří při tvorbě tohoto studijního textu přispěli cennými diskusemi a podněty.

Prohlašujeme, že všechny holografické experimenty související s tímto studijním textem, byly provedeny v laboratoři optiky Ústavu fyziky, stereoskopické práce pak s využitím v projektu zakoupeného vybavení v laboratoři multimédií téhož Ústavu Filozoficko-přírodovědecké fakulty Slezské univerzity v Opavě, Bezručovo nám. 13, 746 01 Opava, Česká republika.

Autoři

B. Cíle kurzu

Cílem kurzu je podat stručný přehled prostorově zobrazujících metod a možností jejich využití k uchování kulturního dědictví lidstva.

Ke 3D zobrazujícím metodám, tj. metodám, které poskytnou trojrozměrný neboli prostorový obraz předmětu či scény, řadíme především holografii a stereoskopii. Seznámíme se tedy se základy holografie a stereoskopie — sem patří především rozbor, jak obě tyto metody provádí záznam obrazové informace (mnohem přesnější je napsat záznam předmětové vlny, která vzniká odrazem na povrchu předmětu či průchodem předmětem) a jak vytváří 3D obraz předmětu. Velmi stručně je popsáno třídění historických uměleckých děl, jejich stárnutí a možnosti diagnostiky stavu uměleckého díla. Je vysvětleno, že stárnutím uměleckého díla obvykle vznikají vady i uvnitř díla a ty se pak často projeví nepatrnými změnami povrchu díla. Tyto změny (deformace) povrchu díla jsou okem těžko postřehnutelné. Zachytit a kvantitativně vyhodnotit velmi malé změny povrchu díla (typicky deformace způsobené stárnutím a s ním spojeným vznikem vad uvnitř díla) umí holografická interferometrie — popisujeme tedy principy holografické interferometrie, její varianty a také postupy, jak přesně určit velmi malé změny povrchu předmětu. Přitom se zaměřujeme na moderní digitální holografickou interferometrii (včetně její ESPI varianty) a určení deformací díla výpočtem na počítači. K odhalení skutečného stavu uměleckého díla (např. malby, fresky, sochy) tak užitím holografické interferometrie a popsaných postupů "nahlédneme" pod povrch uměleckého díla a odhalíme skryté vady uvnitř díla.

U 3D stereoskopických metod jsme se zaměřili pouze na jejich dokumentační roli, tj. schopnost trojrozměrně zachytit stav uměleckých děl — na rozdíl od holografie například také staveb, ulic, měst i krajiny. Ve studijním textu podáváme přehled variant 3D stereoskopie jak pro statický obraz, tak film. Popisujeme, jak zhotovit vlastní 3D fotografie užitím obyčejného fotoaparátu. V nástinu informujeme o současné 3D technice. V závěru studijního textu odkazujeme na náš vlastní autorský 3D dokument, zachycující současný stav starobylého italského městečka Paestum (památka UNESCO). Dokument studenti shlédnou ve 3D projekci v rámci výuky.

Informace o cílech, obsahu předmětu, formě výuky, hodinové dotaci, požadované účasti na přednášce i cvičení, podmínkách absolvování i formě zkoušky jsou uvedeny ve studijním systému STAG Filozoficko-přírodovědecké fakulty Slezské univerzity.

Kapitola 1

Historický úvod do oboru

1.1 Úvodní poznámky

V tomto textu jsou popsány dvě zásadně rozdílné třídy prostorově zobrazujících metod:

1. holografie, a to se zaměřením na digitální optickou holografii a interferometrii
2. stereoskopie.

Popsané holografické a interferometrické metody mohou být základem pro vývoj kompaktní diagnostické aparatury, která je snadno použitelná v diagnostice vad uměleckých děl. Stereoskopické metody pak slouží především k dokumentaci stavu uměleckých děl a poskytují ideální možnost uchování prostorových obrazů celého kulturního bohatství pro budoucí generace.

V tomto textu zmíněné metody využívají výsledků současného technického pokroku — digitální fotoaparáty s vysokým rozlišením, osobní počítače a 3D kamery. Znamená to, že místo konvenčních analogových záznamových materiálů jsou využívána digitální záznamová média (CCD nebo CMOS čipy a smart, compact, SD a další typy záznamových karet). Také proces rekonstrukce či tvorby obrazu odpovídá současným technickým trendům — opět je užita výhradně digitální fotografická a kamerová technika, holografický obraz je rekonstruován digitálně na počítači. V případě digitální holografické interferometrie je pak výsledkem výpočtu buď požadovaný holografický interferogram nebo hledaná fázová mapa.

1.2 Úvodní poznámky k moderním 3D holografickým metodám

Fundamentální principy holografie ([17]) a holografické interferometrie ([3]) jsou dobře známy. Klasická holografie užívá analogová záznamová média (tj. fotovrstvy) a zaznamenané hologramy jsou rekonstruovány světlem. Díky technickému rozvoji je k dispozici digitální záznam hologramů užitím CCD nebo CMOS čipů. Hologramy zaznamenané digitálně je nutno rekonstruovat počítačově, tj. výpočtem. Záznam samotného digitálního hologramu je obvykle proveden užitím specializovaných průmyslových kamer.

Ve studijním textu jsou uvedeny možnosti, jak digitální holografii a holografickou interferometrii v praxi realizovat užitím obyčejného digitálního (kompaktního) fotoaparátu. Jsou popsány nové moderní metody holografického uspořádání (holographic setup) vycházející z možností běžně dostupného digitálního fotoaparátu s (dokonce) neodnímatelným objektivem.

Je prezentována realizace holografie a holografické interferometrie (ve variantě sandwich holography — sendvič holografie) užitím digitálního fotoaparátu. Zaznamenané hologramy jsou rekonstruovány numericky přímým výpočtem rekonstruovaného (reálného) obrazu. Přímý výpočet vychází z postupu, který lze nalézt v [10], ale metoda — jak její autor sám deklaruje — je vhodná pouze pro hologramy zaznamenané užitím monochromatického CCD čipu za podmínky, že nejsou použity žádné čočky, objektivy či jiná zobrazovací zařízení. Vzhledem k tomu, že uspořádání pro záznam hologramu užitím digitálního fotoaparátu obsahuje mnoho zobrazovacích zařízení a je použit barevný CCD čip, musela být metoda dle [10] zobecněna. Toto zobecnění, které rozšiřuje použitelnost metody přímé rekonstrukce výpočtem, je také popsáno.

V tomto textu je rekonstrukce hologramu prováděna užitím počítačového programu, jehož základem je algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT). Pro rekonstruovaný obraz lze získat distribuci jak komplexní amplitudy (nebo intenzity), tak fáze. Jsou diskutovány možnosti získání interferometrických výsledků jak cestou simulace reálného procesu rekonstrukce získání holografických interferogramů, tak cestou přímého výpočtu hledaných intenzit (amplitud) a fází.

Možnosti popsaných holografických metod jsme experimentálně ověřili. Výsledky rekonstrukce jsou buď obrazy holografovaných předmětů nebo požadované holografické interferogramy nebo fázové mapy.

Výše zmíněné metody holografování a holografické interferometrie ([3]) mohou být doplněny o další laserové metody — electronic speckle pattern (obrazec složený z teček, ňubků nebo také kropenatý obrazec) interferomet-

rii ([4]). Je obecně známo, že optické interferometrické metody jsou schopny odhalit malé změny povrchu předmětu, konkrétně mohou být určeny deformace či posunutí řádu $1/10$ vlnové délky použitého světla. Přesto, že tyto moderní metody mají zjevné výhody, využití optických interferometrických metod není tak široké, jak bychom mohli očekávat. Jako příklad může posloužit situace v již zmíněné diagnostice uměleckých předmětů (viz kapitolu 2): komunita restaurátorů dosud neakceptovala holografické interferenční metody, takže užití holografických metod v terénu (in situ) není dnes obvyklé. Domníváme se, že na této skutečnosti se podílí několik faktorů:

- zvyk restaurátorů používat jen mnoha lety používání ověřené metody
- ekonomické aspekty spojené s výdaji na nové aparatury (či měřicí sestavy a vybavení), které navíc dosud nejsou běžně používány a uznávány.

Šanci by měly mít kompaktní interferometrické systémy s jednoduchou obsluhou, jelikož holografická uspořádání typická, pro holografické laboratoře, jsou časově velmi náročná a vyžadují zkušené specialisty. Domníváme se, že zajímavá varianta digitální holografické interferometrie je popsána v této studijní opoře. Tato metoda, založená na užití obyčejného digitálního fotoaparátu, je perspektivní zejména z těchto důvodů:

- záznamy všech hologramů jsou prováděny užitím obyčejného digitálního fotoaparátu
- záznam je digitální, takže může být snadno archivován
- rekonstrukce je digitální na počítači a může být zautomatizována
- zvážíme-li výše uvedené rysy, je realizace kompaktního měřicího zařízení v principu možná a reálná.

Vzhledem k tomu, že je vyvinuta řada uspořádání pro provozování holografie i holografické interferometrie, s nimiž se dá v budoucnu počítat v diagnostice uměleckých předmětů, podáme jejich stručný přehled.

1.3 Úvodní poznámky ke stereoskopickým 3D metodám

Stereoskopické metody záznamu a pozorování obrazu jsou při současné úrovni rozvoje techniky snadněji realizovatelné než metody holografické. Jejich principy jsou lidstvu známy po staletí, čímž má také stereoskopie bohatou historii svého vývoje. 3D stereoskopická fotografie, malířství, grafika, video, to vše

do něj patří. Možností 3D vnímání uměleckého díla samozřejmě využili také umělci, kteří chtěli využitím této technologie sdělit pozorovateli či divákovi více, než umožňuje klasické 2D zobrazení. Na trhu je běžně dostupná 3D stereografická technika pro film i fotografii, jsou dostupné také počítačové programy pro zpracování pořízených záznamů. K nejintenzivnějšímu rozvoji 3D stereoskopie došlo v roce 2011 (za masové podpory velkých elektronických gigantů), nyní se nacházíme - ovšem pouze po stránce komerční - spíše v útlumu. Předpokládáme, že tento stav se změní s odstraněním používání 3D stereoskopických brýlí, což je snad jediná omezující pomůcka, nutná pro ekonomicky dostupné kvalitní sledování 3D děl (filmů, videa a částečně i fotografií). Čeká se tedy na kvalitní a cenově přiměřenou bezbrýlovou techniku, tj. 3D bezbrýlová promítací plátna, 3D bezbrýlové TV a 3D bezbrýlová kina.

Kapitola 2

Význam ochrany kulturního dědictví

S rozvojem civilizace stále vzrůstá zájem o ochranu kulturního dědictví, protože chceme uchovat hodnotná umělecká díla pro budoucí generace. S plynoucím časem se stav původně nových uměleckých děl mění, samozřejmě se zhoršuje. Existuje nebezpečí, že v určitých případech by rostoucí poškození mohlo vést k nevratným ztrátám. Diagnostika stavu uměleckých děl má tři hlavní cíle:

- zjistit a popsat aktuální stav uměleckého díla
- nalézt hlavní vlivy, které způsobují, že stav uměleckého díla je horší, než je nezbytně nutné
- určit optimální podmínky, za nichž je životnost uměleckého díla maximální.

Ke zjištění aktuálního stavu uměleckého díla mohou sloužit tyto nedestruktivní diagnostické metody ([1], [2]):

- rentgenová fluorescence a radiografie
- ultrafialová a infračervená reflektografie (odraz v oboru UV a IR světla)
- atomová spektroskopie (studium elektromagnetického záření absorbovaného či emitovaného atomy)
- neutronová aktivace
- tomografie a sonografie.

Volba vhodné metody závisí na typu uměleckého díla — rozlišujeme následující hlavní druhy uměleckých děl:

- malby na podložkách (např. na plátně)
- sochy
- fresky.

Umělecké dílo samozřejmě přirozeným způsobem stárne. Kromě toho však kumulativní vliv následujících tří hlavních faktorů může vést k dalšímu zhoršení stavu uměleckého díla:

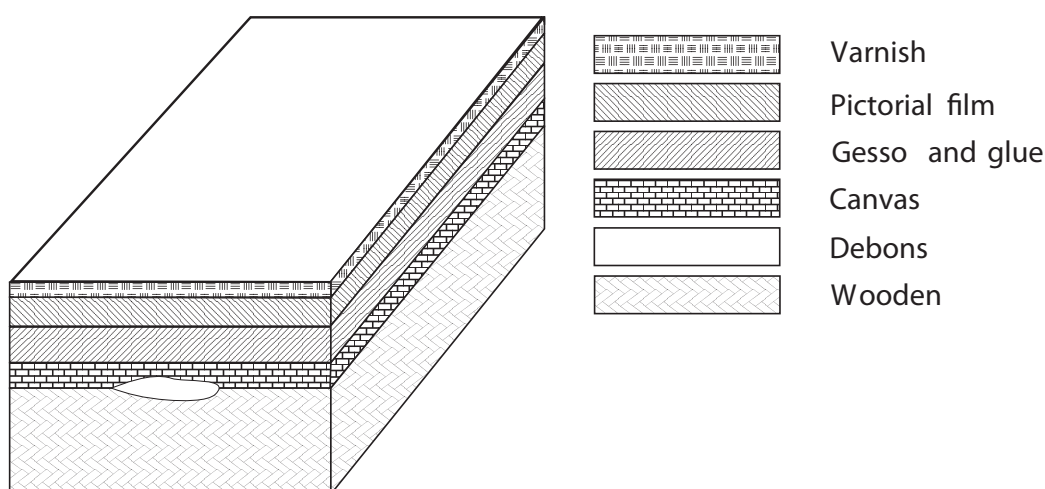
1. přítomnost vnitřního pnutí vznikajícího změnami parametrů okolního prostředí včetně jeho atmosférického znečištění
2. malé deformace nebo nestejnorodosti (nespojivosti) materiálu dřevěných podložek či stěn (tvoří podkladové vrstvy nanesených maleb)
3. tepelné proudění vzduchu (například).

Zmínili jsme tři hlavní skupiny uměleckých děl. Každé umělecké dílo je z určitého konkrétního materiálu, tytéž materiály jsou používány při restaurování. Typickými materiály pro umění jsou mramor nebo pískovec, dřevo a malířské plátno. Protože umělecká díla musí odolávat mechanickému a/nebo tepelnému namáhání a vlivu chemických a biologických činitelů, je přirozené studovat chování materiálů uměleckých děl za těchto vlivů.

Kromě toho často jsou v materiálu uměleckého díla příměsi a tyto nehomogenity ve výsledku vedou k morfologickým změnám díla. V těchto případech mohou být právě interferometrické postupy použity jako nástroje k detekci těchto změn. Známé interferometrické techniky zahrnují klasickou a holografickou interferometrii a speckle interferometrii (někdy také česky interferometrii skvrnovou). Všechny typy interferometrie jsou schopny najít malé morfologické změny — deformace — studovaného předmětu.

Všechna poškození jsou výsledkem vzájemného působení mezi uměleckým výtvořem a vnitřními nebo vnějšími vlivy. Vnitřní faktory souvisí s vlastní hmotou díla, vnější pak s vlivy vnějšího prostředí, kterým je předmět stále vystaven.

Vnitřní faktory jsou určeny fyzikálními, chemickými a případně biologickými charakteristikami materiálů. V kamenném artefaktu (výtvořu) závisí poškození na jeho mineralogii, chemickém složení, struktuře a textuře (povrchové struktuře), mezním tlakovém zatížení, teplotním součiniteli délkové roztažnosti, odolnosti vůči nárazu a opotřebení. Malty a sádky jsou také nehomogenní, takže fresky jsou často poškozeny kvůli těmto původním nehomogenitám. Bronzy také mají mnoho primárních nehomogenit, např. mikropřasklin (které vznikají v průběhu tuhnutí i po něm), příměsí a oxidačních



Obrázek 2.1: Typická vrstvená struktura na dřevěném panelu, jak byla používána u maleb od 13. století. Dřevo (wooden) je opatřeno několika podkladovými vrstvami (plátno, tmely a lepidla), které tvoří základ pro malbu (krytou lakem).

složek. Dřevo je složeno z ligninu a strukturálních sacharidů, celulózy a hemicelulózy, přitom tyto složky jsou rozloženy nehomogenně, což může být příčinou poškození (tj. vady díla).

Mezi *vnějšími vlivy* jsou zásadními teplota a voda, které vedou k poškození ve všech chemických reakcích jako je hydratace, karbonizace a sulfatizace. Mnohá poškození jsou v korelaci s klimatem: změny rozměrů způsobené zvýšením či snížením teploty, koroze vlivem větru a kyselinami znečištěného vzduchu. Biologické faktory jsou zásadními pro většinu materiálů — kámen trpí koloniemi bakterií a lišejníků, dřevo je ovlivněno červy a termity, na fresky působí mikroorganismy a mikroflóra, čímž dochází ke změnám barev, odlupování povrchu a odtržení od podkladových vrstev malty.

Studium různých typů poškození vyžaduje vyhodnocení případ od případu. Vztah mezi typem materiálu, vlivy prostředí a podstatou poškození je v mnoha případech neznámý. Zatím nebývá možné provést kvantitativní vyjádření poškození ve vztahu k jednotlivým vlivům, provádí se jen kvalitativní vyhodnocení.

První holografické interferometrické studie uměleckých děl byly provedeny na dřevěných výtvořech ([5]). Protože malby na dřevě mohou být pokládány za vrstvenaté struktury (viz obrázek 2.1) s oporou, jsou zvláště vhodné pro testování optickými technikami. V obrázku 2.1 je znázorněno typické uspořádání vrstev na dřevěné podložce, jak bylo užíváno v malířství od 13. století. Na dřevo je nanášeno několik podkladových vrstev, které tvoří základ či po-

klad pro malbu. Tyto tenké podkladové vrstvy, obvykle sestávající ze směsi plnidla a lepidel, jsou křehčí než nosný podklad (dřevo). Stárnutím ztrácejí podkladové vrstvy pružnost, takže protažení či smrštění podkladu může vytvářet pnutí, deformace a případně trhliny v podkladových vrstvách. Nepředvídatelné změny pnutí v heterogenních materiálech podkladu malby s následným poškozením malby mívají příčiny v prudkých změnách vlhkosti, teploty a vibracích způsobených dopravou.

Kromě toho může na dřevěné výtvoře destruktivně útočit hmyz. Během svého růstu vytvářejí larvy ve dřevě tunely, čímž redukuje vnitřek panelu nebo sochy na podobu včelího plástu aniž jsou navenek patrné známky poškození. K tomu navíc přistupuje skutečnost, že dřevo obecně má nepravidelnou vláknovou strukturu se spoustou anomálií. Často se pak různé síly vyvinou uvnitř dřeva samotného, takže kus dřeva může vykazovat trhliny a praskliny ve směru vláken.

Všechny tyto mechanismy mohou vést k vytváření odchlípnutí a prasklin. Je samozřejmě důležité vědět, jak praskliny a nespojitosti podkladu mění pohyby povrchu malby. Dřevěné modely s podkladovými vrstvami i bez nich mohou být analyzovány holografickými metodami s cílem získat informace o chování základních komponent malby.

Fresky ve starých kostelích nebo venku vykazují stejné problémy jako dřevěné malby na panelech, ale situace je komplikovanější, protože obecně se fresky nacházejí ve starobylých budovách nebo jsou vystaveny nepříznivým atmosférickým vlivům venku. Protože fresky jsou také vrstevnatými strukturami, výše uvedené vlivy, především teplota a vlhkost, způsobují změny interních napětí v materiálu fresky, což vede k mikroskopickým destrukcím a tvorbě mikrotrhlin. Napětí a tlak stěny způsobují deformace nebo trhliny v malovaném povrchu, což nakonec vede k úplnému rozpadu uměleckého díla. Studium takových prasklin a deformací by mělo vést k nalezení optimálních mikroklimatických podmínek pro zachování starých fresek. Výzkumy se provádějí v testovacím prostředí (klimatických komorách) nebo přímo v terénu.

Kapitola 3

Holografické metody vzniku, záznamu a rekonstrukce 3D obrazu. Vlastnosti obrazu.

3.1 Obecné principy zobrazení, zrod holografie.

Zaznamenat informaci o zvoleném předmětu můžeme užitím fotografie nebo holografie. Pomocí fotografie je člověk schopen trvale zaznamenat téměř všechno, co jeho oko vidí, od roku 1900. Optické čočky, na nichž je fotografie založena, byly vynalezeny několik století dříve a způsob, jakým čočka vytváří obraz, byl také dobře vysvětlen do roku 1900. Fotografie má velký vědecký význam a nadále se od svého vzniku vyvíjí. Dokonce i dnes se nachází nové možnosti využití fotografie.

Holografie byla vynalezena Denisem Gáborem v roce 1948. Nejdůležitější krok od Gáborovy holografie k té dnešní přišel v roce 1962 — byl to objev neosové holografie, který učinili Emmet Leith and Juris Upatnieks, oba z univerzity v Michiganu. Za druhý nejdůležitější krok k mnoha současným užitečným aplikacím holografie pokládáme vynález objemové holografie učiněný Denisjukem také v roce 1962. Je známo, že hlavní výhodou reflexní objemové holografie je její schopnost rekonstrukce užitím obyčejného, tj. nekoherentního, světla.

Renesance holografie přišla v roce 1962 po objevu laseru. Tak se stalo, že v období po roce 1962 bylo napsáno více než 500 článků na téma holografie. Některé se duplikovaly a byly učiněny i mylné závěry. Podstatné ovšem je, že v tomto období byly také publikovány články, které řeší některé aspekty holografie definitivně, tyto články tvoří také základy současné holografie.

Můžeme říci, že holografii, jakožto novou metodu vzniku optického obrazu, má věda k dispozici od roku 1962.

Fotografie a holografie mají společnou tu vlastnost, že obě jsou metodami, které jsou schopny trvale uchovat určité informace o předmětu. Jakmile však začneme studovat hlavní rysy fotografického a holografického obrazu (pomiňme, že někteří autoři odmítají mluvit o holografickém obrazu a důsledně hovoří o rekonstruované předmětové vlně), rychle poznáme, že fotografie a holografie jsou zcela odlišné.

Napsali jsme, že 'obrazy' téhož předmětu vytvořené fotograficky a holograficky jsou zcela odlišné. Důvod spočívá v tom, že fotografování a holografický záznam vycházejí ze zcela odlišných úvah. Pro vysvětlení připomeňme pojem 'předmětové vlny' — to jest vlny, kterou vytváří každá (osvětlená) obecná scéna jakožto reakci na své osvětlení. Předmětová vlna vzniká rozptylem (rozptýleným odrazem) osvětlovací vlny na předmětu (resp. na celé předmětové scéně) nebo průchodem osvětlovací vlny předmětem. Co je podstatné — v obou případech je to vlna, která v sobě nese informaci o předmětu, tuto informaci vlna získala právě předchozí interakcí s předmětem (tj. rozptylem na něm či průchodem předmětem). Právě předmětovou vlnu se pokoušíme co nejdokonaleji zaznamenat, a to jak v případě fotografie, tak holografie. Připomeňme ještě, že scéna de facto sestává z vysokého počtu světlo odrážejících či svítících bodů. Dílčí vlny od všech těchto bodů se skládají v naši výslednou předmětovou vlnu. Zopakujme, že předmětová vlna obsahuje informaci o předmětu proto, že předmět do ní informace o sobě vtisknul, čímž unikátním způsobem ovlivnil rozložení amplitudy i fáze předmětové vlny.

V případě fotografie je tato výsledná komplexní vlna transformována objektivem v obrazovou vlnu svítícího předmětu. Fotografie tak z původní předmětové vlny po její transformaci objektivem dokáže zaznamenat jen dvourozměrnou distribuci její intenzity. Jinými slovy — fotografie do záznamového prostředí zapíše pouze intenzitní poměry dopadající transformované předmětové vlny. Fázová informace, kterou nese předmětová vlna (viz výše), tedy zaznamenána není a dokonce je navždy ztracena. Fotografie tedy není schopna zaznamenat úplnou informaci o předmětu (fázové informace zcela chybí), takže fotografií zaznamenaná informace o předmětu je hodně neúplná. A pouze tuto neúplnou a tedy jen částečnou informaci o předmětu fotografie poskytuje při prohlížení fotografií.

Naproti tomu holografie nezaznamenává obraz předmětu (pro představu — např. obraz vytvořený objektivem), ale kompletní předmětovou vlnu, tj. její amplitudovou i fázovou složku. A to je zásadní rozdíl oproti fotografii. Vlastní holografický záznam se provádí užitím interference světla. Z hotového holografického záznamu (zvaného hologram) může být — užitím vhodného osvětlení — rekonstruována, tj. obnovena čili znovu vytvořena, původní před-

mětová vlna, takže při pozorování takto z hologramu rekonstruované předmětové vlny (tj. pro mnohé z nás holografického obrazu) nelze rozlišit, zda sledujeme původní předmět nebo jeho holografický obraz.

Jestliže vyjdeme z výše uvedeného, můžeme:

1. Holografii použít k záznamu 3D obrazu zvolených předmětů.
2. Použít holografickou interferometrii ke studiu deformací a/nebo posunutí předmětu (nebo také jinými slovy provádět diagnostiku stavu předmětu užitím holografické interferometrie). Velmi vhodnou tak může být aplikace holografické interferometrie při zkoumání stavu historických objektů a uměleckých děl.

3.2 Záznam hologramu

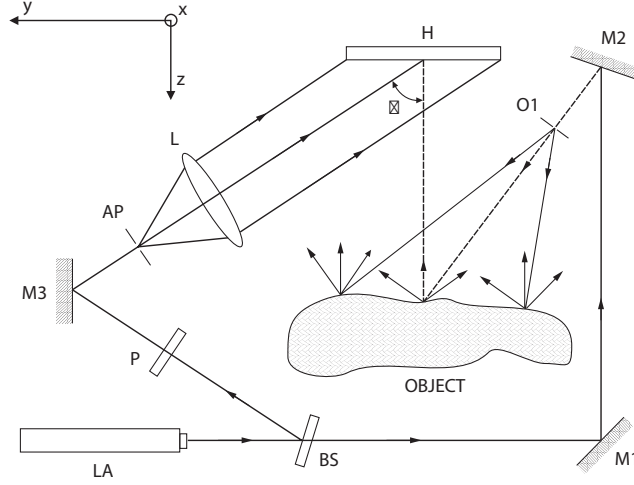
Můžeme rozlišovat tzv. osovou (on-axis nebo in-line) a neosovou (off-axis) holografii. Nyní stručně popíšeme principy neosové holografie. Ta je v současné době obecně nejpłodnější holografickou metodou v nedestruktivní diagnostice, tedy i diagnostice uměleckých předmětů. Neosová holografie (stejně jako celá holografie také obecně) sestává ze dvou hlavních kroků:

1. záznamové fáze
2. rekonstrukční fáze.

Uspořádání pro záznam neosové holografie je na obrázku 3.1. Světlo z laseru LA je rozděleno děličem svazku BS na předmětovou vlnu a vlnu referenční ve vhodném poměru intenzit. Předmětová vlna se odráží na zrcadlech $M1$, $M2$ a potom je rozšířena mikroskopovým objektivem $O1$ a dopadá na předmět $OBJECT$. Osvětlený předmět rozptyluje dopadající světlo, jehož část konečně dopadá na použité záznamové médium H .

Referenční vlna může být zeslabena polarizátorem P , potom se odráží na zrcadle $M3$ a prochází clonou AP a čočkou L předtím, než dopadne také na záznamové médium.

Protože v oblasti záznamového média se setkávají dvě koherentní vlny, tak spolu vzájemně interferují a vzniká interferenční pole. Část (tj. jistý výsek) tohoto interferenčního pole je zaznamenána zmiňovaným vloženým záznamovým prostředím — vzniklý záznam se nazývá hologram. Lze-li záznamové médium pokládat za dvourozměrný útvar, dostáváme rovinný hologram (tloušťka záznamu je tedy zanedbatelně malá, řekněme blízká nule) a mluvíme o rovinné neboli plošné holografii, v opačném případě dostáváme objemový hologram a mluvíme o objemové holografii.



Obrázek 3.1: Uspořádání pro záznam v neosové holografii. Světlo z laseru LA je rozděleno děličem svazku BS na předměťovou a referenční vlnu. Předmětová vlna se odráží na zrcadlech $M1$, $M2$, je rozšířena pomocí čočky (objektivu) $O1$ a dopadá na předmět $OBJECT$. Osvětleným předmětem rozptýlené světlo dopadá na použité záznamové médium H . Referenční vlna zeslabená polarizátorem P se odráží na zrcadle $M3$ a po průchodu clonou AP a čočkou L dopadá také na záznamové prostředí.

V následujícím popisu předpokládáme plošný hologram, takže komplexní amplituda $o(x, y)$ předmětové vlny a komplexní amplituda $r(x, y)$ referenční vlny v záznamové rovině xy může být vyjádřena

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp [i\varphi(x, y)] = |o| \exp (i\varphi), \quad (3.1)$$

$$r(x, y) = |r(x, y)| \exp [i\psi(x, y)] = |r| \exp (i\psi), \quad (3.2)$$

kde $|o(x, y)|$ and $|r(x, y)|$ jsou reálné amplitudy světelných vln a $\varphi(x, y)$ a $\psi(x, y)$ jejich fáze.

Ve své nejjednodušší podobě je referenční vlna $r(x, y)$ rovinnou vlnou konstantní intenzity, takže

$$|r(x, y)| = A_r = const., \quad (3.3)$$

a fáze v záznamové rovině

$$\psi(x, y) = y \frac{2\pi}{\lambda} \sin \xi, \quad (3.4)$$

λ je vlnová délka světla použitého laseru, ξ je úhel dopadu referenční vlny na hologram. Protože úhel dopadu referenční vlny na hologram je roven nule, je

ξ také úhel mezi předmětovou a referenční vlnou (ξ je také nazýván *holografickým úhlem*).

Vzájemně koherentní předmětová a referenční vlna interferují tak, že výsledné amplitudy v záznamové rovině jsou $o(x, y) + r(x, y)$ a odpovídající celkové intenzity pak

$$\begin{aligned} I(x, y) &\propto |o(x, y) + r(x, y)|^2 \\ &= |o(x, y)|^2 + A_r^2 + o^*(x, y)r(x, y) + o(x, y)r^*(x, y), \end{aligned} \quad (3.5)$$

kde $*$ značí komplexní konjugaci (komplexně konjugované číslo).

Pro jednoduchost předpokládejme, že dostaneme hologram s amplitudovou propustností $t(x, y)$, která je přímo úměrná intenzitě v 3.5

$$t(x, y) \propto I(x, y), \quad (3.6)$$

potom

$$t(x, y) \propto |o(x, y)|^2 + A_r^2 + o^*(x, y)r(x, y) + o(x, y)r^*(x, y). \quad (3.7)$$

Pro rovinnou referenční vlnu s konstantní amplitudou A_r a fází $y \frac{2\pi}{\lambda} \sin \xi$ lze 3.7 přepsat do tvaru

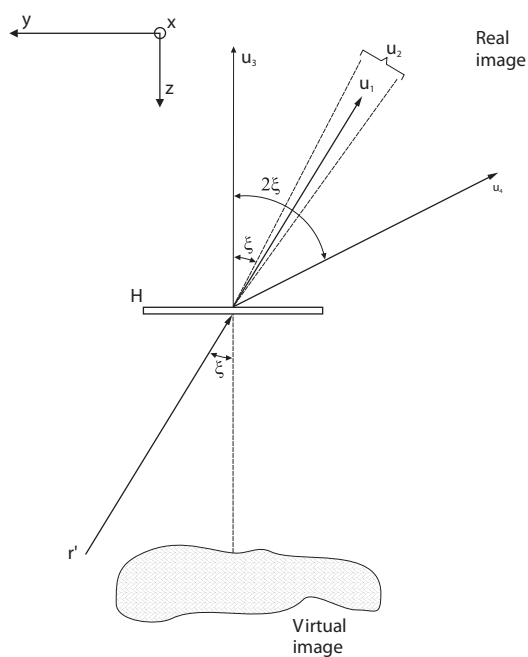
$$t(x, y) \propto o(x, y)^2 + A_r^2 + 2|o(x, y)| A_r \cos \left[y \frac{2\pi}{\lambda} \sin \xi - \varphi(x, y) \right]. \quad (3.8)$$

Touto cestou zaznamenaná komplexní amplituda $o(x, y)$ obsahuje úplnou informaci (tj. rozložení amplitudy i fáze) o předmětu.

3.3 Rekonstrukce hologramu

V podkapitole 3.2 jsme popsali, jak se dá zaznamenat plošný amplitudový hologram předmětu (viz obr. 3.1). Nyní můžeme přikročit k obnově původní předmětové vlny. Odstraňme předmět *OBJECT* a umístěme hologram H na jeho původní místo v našem uspořádání. Jestliže osvětlíme hologram H (viz obr. 3.2) nezměněnou referenční vlnou $r'(x, y) = r(x, y)$, difraguje (tj. ohýbá se, dochází k ohybu vlny ve smyslu vlnové optiky) osvětlovací vlna na interferenční struktuře hologramu (hologram působí jako ohybová mřížka) a vzniká interferenční obrazec. Je-li amplitudová propustnost hologramu $t(x, z)$ dána vztahem 3.8, je komplexní amplituda $u(x, y)$ hologramem prošlé vlny v rovině hologramu $z = 0$

$$u(x, y) = r(x, y)t(x, y) = u_1(x, y) + u_2(x, y) + u_3(x, y) + u_4(x, y), \quad (3.9)$$



Obrázek 3.2: Vlny vznikající při rekonstrukci neosového hologramu. Jestliže osvětlíme hologram H rekonstrukční vlnou r' , za hologramem můžeme rozlišit tyto vlny: u_1 je zeslabená verze referenční vlny, u_2 produkuje rozptýněné světlo obklopující referenční vlnu, u_3 vytváří primární a u_4 sekundární rekonstruovaný obraz. Úhel ξ je záznamový holografický úhel.

kde

$$u_1(x, y) \propto r(x, y) \times A_r^2 \quad (3.10)$$

je zeslabená verze referenční vlny,

$$u_2(x, y) \propto r(x, y) \times |o(x, y)|^2 \quad (3.11)$$

dává rozptýlené světlo obklopující referenční vlnu (úhlový rozsah tohoto rozptýleného světla je určen úhlovým rozsahem předmětu),

$$u_3(x, y) \propto o(x, y) \times A_r^2 \quad (3.12)$$

je (až na konstantu) identická s původní předmětovou vlnou a vytváří primární obraz předmětu v místě jeho původního umístění,

$$u_4(x, y) \propto A_r^2 \exp(iy \frac{4\pi}{\lambda} \sin \xi) \times o^*(x, y) \quad (3.13)$$

dává vznik sekundárnímu (konjugovanému) obrazu.

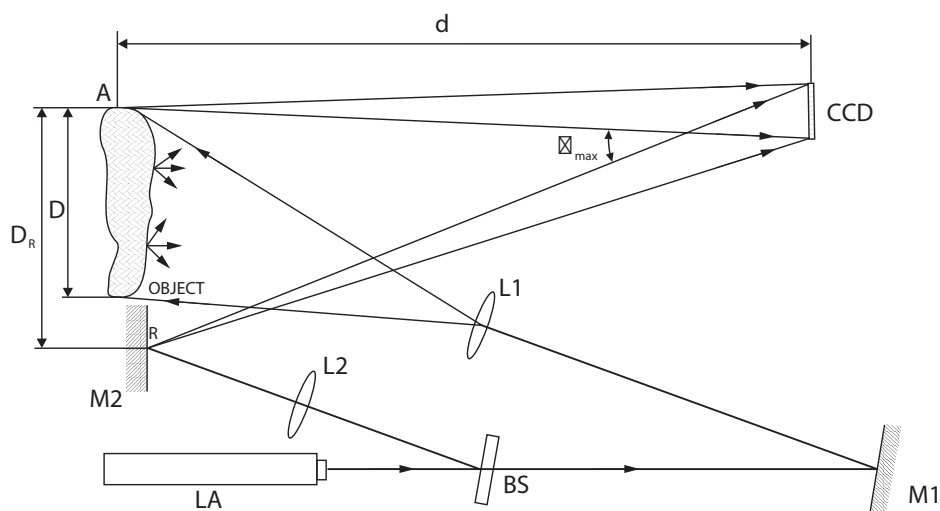
Protože v našem případě je geometrie uspořádání při rekonstrukci totožná s geometrií při záznamu, je získaný primární obraz virtuální zatímco sekundární obraz je reálný.

Vlna odpovídající sekundárnímu obrazu (nebo také sekundární obraz) je odkloněna od osy z o úhel přibližně rovný hodnotě 2ξ . Jestliže úhel ξ mezi referencí a předmětovou vlnou je dostatečně velký, pak je virtuální (tj. zdánlivý) obraz separován (tj. úhlově oddělen) od přímo propuštěného svazku a reálného konjugovaného obrazu. Musíme poznamenat, že posun sekundárního obrazu u_4 pro velké ξ určuje zkreslení reálného obrazu. Protože v holografické interferometrii se používá převážně virtuální obraz, může být uvedené zkreslení v tomto kontextu ignorováno.

Jaké jsou vlastnosti našeho hlavního primárního holografického obrazu? Jestliže se umístění hologramu v průběhu procesu rekonstrukce vůbec nezmění oproti jeho umístění při záznamu hologramu a hologram je osvětlen vlnou, která je totožná s vlnou použitou při záznamu, pak má obraz stejnou velikost jako původní předmět a splývá s ním. Ve všech ostatních případech může obraz vykazovat vady. Obecně můžeme konstatovat, že pokud při procesu rekonstrukce (samozřejmě oproti uspořádání při záznamu hologramu) jakkoli změním umístění zdroje světla nebo jeho vlnovou délku, vede to ke změně umístění a velikosti rekonstruovaného obrazu.

3.4 Specifické rysy digitální holografie

Digitální holografie je specifickým druhem holografie — hologramy jsou zaznamenávány a rekonstruovány digitálně. Digitální záznam na CCD nebo



Obrázek 3.3: Uspořádání používané pro záznam digitálních hologramů na CCD čipy. Světlo (svazek světla) z laseru LA je děličem paprsku (svazku) BS rozděleno na předměťovou a referenční vlnu. Předmětová vlna se odráží na zrcadle $M1$, je rozšířena předměťovým objektivem $L1$ a dopadá na předmět $OBJECT$. Světlo rozptýlené předmětem dopadá na záznamový CCD čip. Referenční vlna je rozšířena čočkou (objektivem) $L2$ a dopadá na zrcátko $M2$, umístěné poblíž předmětu, a potom také dopadá na záznamový CCD čip. Předmětová a referenční vlna spolu interferují v CCD rovině.

CMOS čip nemůže být rekonstruován fyzicky světlem, ale může být rekonstruován numericky výpočtem na počítači. Výsledkem výpočtu je spočtená distribuce komplexní amplitudy (eventuálně intenzity) holografických obrazů. Je také možné kombinovat klasickou a digitální holografii — záznam hologramu je proveden klasicky na záznamové médium (jako je např. fotografická deska nebo film) a potom je tento záznam digitalizován. Digitální hologramy stejně jako odpovídající rekonstruované obrazy mohou být uloženy v počítači na disku (samozřejmě jak pevném, tak přenosném).

3.4.1 Možnosti záznamu

Je několik možností záznamu digitálního hologramu užitím digitálních snímačů obrazu (CCD či CMOS čipu). Obrázek 3.3 [11] zachycuje typické uspořádání pro záznam Fresnelova hologramu.

Světlo (svazek světla) z laseru LA je děličem paprsku (svazku) BS rozděleno na předměťovou a referenční vlnu. Předmětová vlna se odráží na zrcadle $M1$, potom je rozšířena předměťovým objektivem $L1$ a dopadá na před-

mět *OBJECT*. Světlo rozptýlené předmětem pak dopadá na záznamový CCD čip. Referenční vlna je rozšířena čočkou (objektivem) $L2$, dopadá na zrcátko $M2$, umístěné poblíž předmětu, a po odrazu také dopadá na záznamový CCD čip. Předmětová a referenční vlna spolu interferují, v rovině CCD je intenzita vytvořeného interferenčního pole popsána rovnicí 3.5.

Hlavním problémem (a tím i specifickým rysem) současné digitální holografie je stále ještě nízká prostorová rozlišovací frekvence CCD čipů. Maximální prostorová frekvence, která může být čipem rozlišena a tedy i zaznamenána, je omezena velikostí pixelu Δx . Jestliže chceme zaznamenat hologram celého předmětu (viz obr. 3.3), rozlišení CCD v kameře musí být alespoň takové, že dostačuje i pro záznam interferenčních proužků vytvořených referenční vlnou a předmětovou vlnou z bodu A , který je nejvzdálenější od bodového zdroje R referenční vlny. Protože uspořádání pro záznam hologramu dle obr. 3.3 je verzí neosové holografie — ve které je prostorová frekvence f_s určena úhlem ϑ mezi předmětovou a referenční vlnou dle vztahu [17] $f_s = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\vartheta}{2}$ (kde λ je vlnová délka použitého monochromatického světla) — je maximální prostorová frekvence f_{max} pro vlnovou délku λ

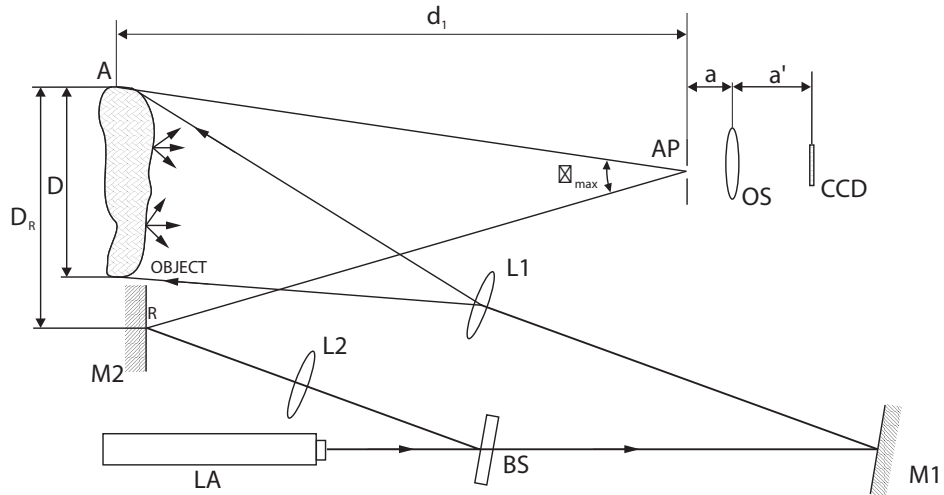
$$f_{max} = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\vartheta_{max}}{2}, \quad (3.14)$$

kde ϑ_{max} je maximální úhel mezi referenční a předmětovou vlnou v obrázku 3.3. Vezmeme-li v úvahu vzorkovací teorém (viz [16]), je maximální prostorová frekvence, která může být zaznamenána, rovna $f_{max} = 1/(2\Delta x)$, což dává úhel $\vartheta_{max} = \lambda/(2\Delta x)$.

Abychom podmínce 3.14 vyhověli, je nutné zmenšit úhel ϑ_{max} . Toho může být dosaženo (viz obr. 3.3) zvýšením vzdálenosti d mezi předmětem a CCD. Je-li velikost předmětu D , $D_r = AR$ a $d \gg D_r$, pak pro maximální úhel dostáváme $\vartheta_{max} = D_r/d$. Pro pixel o velikosti $\Delta x = 7\mu\text{m}$, vlnovou délku $\lambda = 0,7\mu\text{m}$ a velikost předmětu $D \cong D_r \cong 50\text{ cm}$ dostáváme pro výslednou vzdálenost d mezi předmětem a CCD $d \cong 15\text{ m}$. Uspořádání, ve kterém je předmět vzdálen od CCD asi 15 m, je však v praxi nepoužitelné (protože vzdálenost je příliš velká, takže intenzita světla předmětové vlny by byla beznadějně malá).

Mnohem užitečnější řešení může být založeno na myšlence, která je znázorněna na obrázku 3.4. Základem tohoto uspořádání je zvětšení interferenčního obrazce, vytvořeného v rovině clonky AP , použitím vhodného optického systému OS . Toto uspořádání je podrobně diskutováno v odkazu [24].

Je vhodné ještě poznamenat (jde totiž o zajímavou možnost), že hologram zaznamenaný v uspořádání dle obr. 3.3 může být rekonstruován užitím rovinné rekonstrukční vlny namísto vlny sférické. V tomto případě mluvíme o quazi-Fourierově hologramu. Takový hologram je pozoruhodný tím



Obrázek 3.4: Modifikované uspořádání pro záznam Fresnelova neosového hologramu založené na zvětšení interferenčního obrazce, vytvořeného v rovině clony AP , užitím vhodného optického systému OS .

(viz [17]), že ostrý a použitelný je jak primární, tak sekundární obraz.

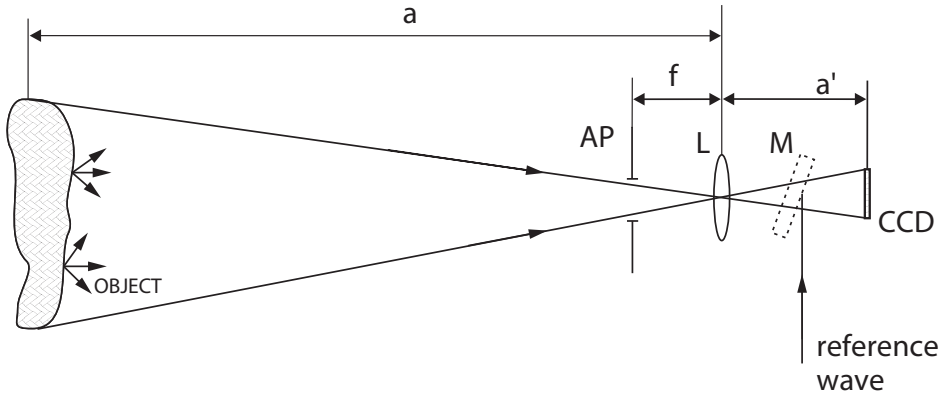
Další možnost, jak realizovat záznam hologramu na CCD, je zobrazena na obr. 3.5. V tomto uspořádání je obraz předmětu *OBJECT* promítán čočkou či objektivem L na CCD chip — to je předmětová vlna. Referenční vlna je na CCD přivedena využitím odrazu na polopropustném zrcadle M umístěném blízko záznamového CCD čipu. Abychom zachovali nízkou maximální prostorovou frekvenci interferenčního pole (viz vztah 3.14), je clona AP umístěna v předmětové ohniskové rovině čočky L .

3.4.2 Možnosti rekonstrukce

Předpokládejme, že zaznamenaný hologram je digitálně uložen v počítači. Rekonstrukci tohoto hologramu lze provést digitálně výpočtem na počítači. Výpočet vychází z Huygens-Fresnelovy vlnové teorie a Fresnel-Kirchhoffova ohybového vzorce [18]. Výsledkem výpočtu je distribuce komplexní amplitudy $u(x, y)$ ve zvolené rovině ve vzdálenosti z od hologramu — blíže viz [24].

Máme-li zaznamenaný plošný hologram (fig. 3.5), můžeme k jeho rekonstrukci přistoupit dvěma způsoby. Tím prvním je skutečně fyzicky rekonstruovat původní předmětovou vlnu, druhým pak přímý výpočet metodou posuvu fáze prostorové frekvence.

Jelikož metoda rekonstrukce vlnolochy je detailně popsána v článku [24], zabýváme se nyní metodou posuvu fáze [19] [11]. Na každý hologram se



Obrázek 3.5: Uspořádání pro záznam plošného hologramu. Obraz předmětu *OBJECT* je promítán čočkou *L* na CCD čip - to je předmětová vlna. Referenční vlna je přivedena odrazem na polopropustném zrcadle *M* umístěném blízko záznamového CCD čipu. Clona *AP*, vložená do předmětové ohniskové roviny čočky *L*, umožňuje zachovat nízkou maximální prostorovou frekvenci interferenčního pole (viz vztah 3.14).

můžeme dívat jako na nositele vlny, jejíž prostorová frekvence je modulována předmětovou informací (tj. informací, kterou do ní o sobě vtiskl předmět při záznamu). Pro zjednodušení našeho popisu použijme jako referenci rovinnou vlnu $r(x, z, y)$. V rovině $z = 0$ můžeme předmětovou vlnu $o(x, y)$ a referenční vlnu $r(x, y)$ zapsat ve tvaru

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp [i\varphi(x, y)], \quad (3.15)$$

$$r(x, y) = |r(x, y)| \exp \left(iy \frac{2\pi}{\lambda} \sin \vartheta_0 \right), \quad (3.16)$$

kde ϑ_0 je úhel mezi optickou osou a směrem šíření rovinné referenční vlny. Pro malé úhly ϑ_0 můžeme psát

$$f_0 = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\vartheta_0}{2} \cong \sin \frac{\vartheta_0}{\lambda}, \quad (3.17)$$

takže rozložení intenzity v našem hologram je

$$I(x, y) = |u(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + |u(x, y)| |r(x, y)| \cos [2\pi f_0 y - \varphi(x, y)]. \quad (3.18)$$

Tento vztah popisuje soustavu interferenčních proužků s nosnou prostorovou frekvencí f_0 , jejíž amplituda je modulována funkcí $|u(x, y)|$ a fáze funkcí $\varphi(x, y)$. Metoda, která umožňuje nalezení fáze v rovnici 3.18 a která využívá Fourierovy transformace, je právě metoda posuvu fáze prostorové frekvence

(nebo také metoda shody sinusoid). Aby tato metoda byla použitelná, musí se fáze od jednoho pixelu CCD čipu k druhému měnit pomalu. Tato podmínka je splněna, je-li prostorový rozsah světelných skvrn (speckles) ve směru y větší nebo roven třem pixelům. Ve směru x by velikost světelných skvrn měla být větší než jeden pixel. Jestliže se tedy fáze $\varphi(x, y)$ od jednoho pixelu k sousednímu mění pomalu, pak změna fáze bude $\alpha = 2\pi\Delta y f_0$. To znamená, že pro výpočet fáze $\varphi(x, y)$ využitím tří sousedních pixelů může být použit standardní algoritmus fázového posunu

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{I(x, y - \Delta y) - I(x, y + \Delta y)}{I(x, y - \Delta y) + I(x, y + \Delta y) - 2I(x, y)} \tan \frac{\alpha}{2} \right), \quad (3.19)$$

$\tan(\alpha/2)$ je roven jedné, je-li $\alpha = 90^\circ$. Metoda fázového posunu není tak přesná jako metoda rekonstrukce vlny (založená na Fourierově transformaci), ale je rychlejší, protože žádná Fourierova transformace se nepočítá.

Kapitola 4

Principy 3D holografické interferometrie

Klasická interferometrie, to jest paprsková interferometrie, umožňuje měření a porovnávání vzdáleností v jednom směru, v přímce. Pomocí holografie jsme schopni obnovit původní vlnu vytvořenou předmětem (tj. rozptýlenou předmětem nebo předmětem prošlou). To nám poskytuje novou možnost pro interferometrii - můžeme porovnávat dvě celé vlny. Tato technika — nazývaná holografická interferometrie — může být považována za zobecnění klasické (konvenční) interferometrie, protože dovoluje porovnání dvou (celých) libovolných vln, které byly původně odděleny jak v prostoru, tak v čase (tedy dvou vln, které mohly vzniknout či existovat na zcela jiných místech vesmíru a mohly také existovat ve zcela rozdílných okamžicích, tj. časech).

V holografické interferometrii srovnáváme celé povrchy (předmětu), což v principu umožňuje určení změn polohy (posunutí) jednotlivých bodů povrchu. Tato vlastnost je skutečně hlavním přínosem holografické interferometrie. V holografické interferometrii srovnáváme s přesností asi jedné desetiny užité vlnové délky dvě částečně koherentní vlny, z nichž aspoň jednu jsme obdrželi rekonstrukcí příslušného hologramu (tj. jako výsledek rekonstrukce hologramu). Protože vlny srovnávané holografickou interferometrií jsou koherentní a situované v téže části prostoru (tedy ve stejném místě), interferují (čili se pro interferenci specifickým způsobem skládají, viz výše), čímž způsobují vznik interferenčního pole a vzniká interferenční obrazec neboli holografický interferogram. Znalost rozložení intenzity v interferenčním obrazci nám umožňuje určit vektor posunutí (tj. změny polohy např. deformací předmětu či pohybem celého předmětu) každého bodu povrchu předmětu.

V současné době můžeme holografickou interferometrii rozčlenit do těchto dvou hlavních tříd:

1. klasická holografická interferometrie
2. digitální holografická interferometrie.

Typickými rysy klasické holografické interferometrie jsou:

- Hologramy jsou zaznamenány na médiu s vysokým rozlišením řádu tisíců interferenčních čar na milimetr (1000–5000 čar/mm). Dobrým příkladem spolehlivého média s takto vysokým rozlišením je i dnes fotografická deska nebo film.
- Rekonstrukce získaných hologramů může být provedena fyzicky, to jest světlem v optické laboratoři, čímž vznikne reálně existující holografický interferogram. Tento holografický interferogram musí být vyhodnocen dalšími postupy. Určení povrchu lokalizace interferenčního obrazce je důležitou součástí vyhodnocení. A co více, je možné vzájemně porovnávat holograficky rekonstruovanou vlnu a vlnu vzniklou např. odrazem na reálném předmětu (pak jde o holografickou interferometrii v reálném čase).

Nyní jen stručně typické rysy digitální holografické interferometrie:

- Záznam hologramu je prováděn na moderní digitální média, která bohužel stále mají relativně nízkou rozlišovací schopnost (nízkou pro holografii).
- Rekonstrukce není prováděna fyzicky světlem v laboratoři, ale výpočetními metodami na počítači.

Rozlišujeme tři základní techniky holografické interferometrie:

- interferometrii v reálném čase
- interferometrii dvojí expozice
- sendvič (raději i v originále - sandwich) holografii.

Volba techniky závisí na konkrétní situaci.

4.1 Holografická interferometrie v reálném čase

Holografická interferometrie v reálném čase (real-time holography) začíná záznamem obyčejného hologramu zkoumaného předmětu, a to zpravidla jeho nedeformovaného (tj. původního) stavu (předmět ve stavu jedna). Záznam takového hologramu může být proveden užitím uspořádání podle obrázku 3.1.

Je-li vytvořený hologram rekonstruován vlnou, která je identická s referenční vlnou užitou při záznamu, pak je rekonstruována původní předmětová vlna předmětu ve stavu jedna (tj. většinou nedeformovaného předmětu), vzniklý obraz je virtuální. V případě interferometrie v reálném čase postupujeme tak, že osvětlovací rekonstrukční vlnou osvětlíme také předmět, čímž samozřejmě vzniká předmětová vlna (tentokrát reálná od osvětleného předmětu). Obě předmětové vlny (jedna vzniklá rekonstrukcí hologramu, druhá vzniklá v reálném čase osvětlením předmětu) spolu interferují, protože jsou (alespoň částečně) koherentní. V případě, že předmět je stále ve stavu číslo jedna (tj. v čase od záznamu hologramu do okamžiku popisované rekonstrukce nedošlo k jeho deformaci ani změně polohy), pak (v ideálním případě) je rekonstruovaná vlna totožná s vlnou předmětovou (vzniklou osvětlením předmětu při rekonstrukci). A nyní - pokud se tvar (tj. povrch) předmětu mírně mění (jinými slovy předmět podléhá morfologickým změnám, nazvěme je deformacemi předmětu, ty mohou být způsobeny např. vnějšími silami nebo silami vnitřními majícími původ např. ve změnách teploty) nebo dochází k posunu či rotaci předmětu, pak se obě původně identické výše popsané vlny začnou vzájemně lišit. Předpokládejme, že obě vlny jsou stále alespoň částečně koherentní, interferují a vzniká holografický interferogram. Holografický interferogram sestává z obrazu předmětu v původním stavu (stav jedna), překrytého interferenčním obrazcem (interferogramem), který charakterizuje změny povrchu předmětu mezi stavy předmětu jedna a dvě.

Hlavní výhodou holografické interferometrie v reálném čase je, že potřebujeme zaznamenat jen jeden hologram k tomu, abychom mohli studovat různé změny zkoumaného objektu. Použití tohoto jednoho jediného hologramu nám umožňuje předmět podrobovat různým statickým nebo dynamickým deformacím. Statické deformace provádíme např. užitím vhodných závažíček nebo termického napětí, každé konkrétní deformaci předmětu pak odpovídá jeden holografický interferogram a pokud je deformace v čase kontinuální, pak se holografický interferogram také kontinuálně mění - je živý. Analýzou interferogramů lze určit změny povrchu předmětu, např. tedy určit deformaci v každém bodě celého povrchu předmětu. Dynamické vlastnosti předmětu mohou být studovány, jestliže předmět podrobíme vibracím — opět platí, že rekonstruovaná vlna (odpovídající stavu jedna předmětu) je srovnávána s předmětovou vlnou vibrujícího předmětu.

Holografická interferometrie v reálném čase má ovšem i své nevýhody:

- Při rekonstrukci musí být předmět vložen na místo, kde se nacházel při záznamu (stavu jedna předmětu), s vysokou přesností řádu jedné desetiny vlnové délky použitého světla, protože jinak mohou falešné interferenční proužky zkreslit např. skutečné hodnoty deformací. Z tohoto

důvodu se k umístění předmětu používá speciální držák s mikroposuvem.

- Kontrast proužků je obecně menší, než u jiných variant holografické interferometrie.
- Protože interferogram je živý (interferogram odpovídající konkrétní deformaci existuje jen v tom okamžiku, kdy k této deformaci předmětu dochází), musí být analyzován ihned, tj. během celé analýzy interferogramu se deformace předmětu nesmí změnit.

Nechtěné interferenční proužky (máme na mysli např. falešné proužky vzniklé při rekonstrukci nepřesným umístěním předmětu na jeho původní místo) mohou být eliminovány užitím různých technik, účinnou je kupříkladu metoda stříhu (neboli posunutí) hologramu při rekonstrukci. Toto posunutí (neboli translace) hologramu generuje dodatečné stříhové proužky (shearing fringes) na holografickém obrazu, které se k proužkům způsobeným deformací buď přičtou nebo se od nich odečtou.

4.2 Holografická interferometrie metodou dvojí expozice

V této metodě se zaznamenávají dva hologramy na totéž záznamové médium, např. na fotografickou desku. Každý hologram zachycuje předmět v jiném stavu (např. původním a deformovaném), oba stavy samozřejmě odděluje jistý časový interval. Při rekonstrukci se pak současně rekonstruují oba zaznamenané hologramy, což znamená, že obě předmětem rozptýlené vlny (obecně obě předmětové vlny) se rekonstruují současně a interferují. Tato interference produkuje trojrozměrný virtuální obraz předmětu a na něm interferenční obrazec, který je obecně obrysovou mapou zněn předmětu. Výhodou je, že tento dvakrát exponovaný hologram (double-exposed hologram) můžeme uschovat a kdykoli později rekonstruovat a analyzovat.

Metoda dvojí expozice je méně obtížná než holografie v reálném čase, protože obě interferující vlny jsou vždy rekonstruovány přesně. V případě, že jako záznamové médium použijeme fotografickou vrstvu, je výhodou, že i deformace emulze ovlivní oba obrazy stejně. Dalším plusem je, že interferenční proužky mají velmi dobrou viditelnost. Je zde však i nevýhoda — protože oba obrazy jsou (jako rovnocenné) na témže hologramu, nedá se určit, který obraz byl zaznamenán první. Potom samozřejmě také není možné určit směr deformace (např. neurčíme, zda došlo ke stlačování či rozpínání předmětu), tuto informaci musíme získat jinak (při experimentech ji samozřejmě známe z jejich průběhu).

4.3 Sendvič holografie

Sendvič holografie (možná lépe v originálu sandwich holography) ([1]) je užitečnou variantou metody dvojí expozice (tj. holografické interferometrie metodou dvojí expozice). V této variantě nejsou obě expozice na jedné destičce (obecně na jediném záznamovém médiu), ale na dvou různých holografických destičkách, které jsou potom společně umístěny v příslušném držáku. Při rekonstrukci jsou oba hologramy umístěny ve speciálním držáku paralelně vedle sebe s emulsemi směrem k předmětu.

Výhody sendvič holografie oproti klasické metodě dvojí expozice jsou zde:

- Protože obrazy máme na dvou různých destičkách, je možné s nimi separátně manipulovat, a tak ovlivňovat výsledný interferenční obrazec. Původně se destičky nakláněly oproti jejich původnímu umístění, později byla navržena nová metoda manipulace s proužky stříhem (posunem - by shearing) jednoho hologramu vůči druhému přesnou justací (čili nastavením polohy) destiček použitím justačního držáku, ve kterém jsou obě destičky umístěny. Manipulace s interferenčními proužky umožňuje odstranit falešné proužky, které vznikly nechtěnou změnou polohy zkoumaného předmětu. Znamená to, že pokud mezi oběma expozicemi dojde k námi nepožadované změně polohy předmětu (taková změna polohy je chybou), můžeme ji při rekonstrukci napravit čili vykompenzovat posunutím jedné holografické destičky vůči druhé.
- Můžeme zhotovit řadu hologramů, z nichž každý zaznamenává jeden konkrétní stav předmětu v běžícím čase. Později — při rekonstrukci — mohou být destičky kombinovány do párů.
- Možnost manipulace proužků dovoluje vyhodnocení lokálních deformací i v případě větších deformací studovaného předmětu, protože až 1000 fringes může být eliminováno pouhým nakloněním dvojice hologramů nebo jejich vzájemným stříhem (tj. posunem). V praxi to znamená, že můžeme přesně vyhodnotit i deformace, při kterých vzniká řádově až 1000 interferenčních proužků.

Sendvič holografie má také své nevýhody:

- Při rekonstrukci musí být hologramy umístěny s vysokou přesností na místo, kde se záznamové destičky nacházely při záznamu.
- Volnost v manipulaci s proužky v sobě zahrnuje nebezpečí možných chyb, takže si musíme zaznamenat referenční body, abychom si byli jisti, že vzniklé interferenční proužky skutečně odpovídají změnám (např. deformaci) předmětu.

4.4 Specifické rysy digitální holografické interferometrie

Typickými rysy digitální holografické interferometrie jsou:

- Záznam hologramu se provádí na moderní digitální média, což stále znamená média s relativně nízkým rozlišením. Charakteristickou vlastností těchto médií je, že při působení světelné vlny mění některou ze svých elektrických charakteristik. Typickými příklady jsou CCD nebo CMOS čipy. CCD čip sestává z určitého počtu pixelů (tj. elementárních záznamových míst). Každý pixel umožňuje buď monochromatický záznam (s určitým počtem úrovní nebo také stupňů šedé) nebo barevný záznam (opět s danou bitovou hloubkou v každé ze tří základních barev). Počet pixelů a velikost každého z nich patří k hlavním charakteristikám CCD čipu, typické hodnoty jsou [12, 13]: velikost pixelu $\Delta x = 5\text{--}11\ \mu\text{m}$, barevná hloubka 10–14 bitů pro každou ze tří základních barev (případně 10–14 bitů pro odstíny šedé). Velikost pixelu určuje rozlišení celého CCD čipu. I při současné technologii CCD čipů je jejich rozlišení nízké (stovky čar/mm), a to jak při srovnání s dostupnými holografickými fotovrstvami filmů a desek, tak z hlediska požadavků holografické interferometrie v oblasti viditelného světla.
- Rekonstrukce není prováděna fyzicky v laboratoři, ale výpočetními metodami na počítači. Je tomu tak proto, že hologram, zaznamenaný digitálně užitím CCD, nemůže být rekonstruován fyzicky světlem. Proto je holografická interferometrie v reálném čase vyloučena a obě srovnávané vlny musíme získat **výpočtem**. Avšak počítačová rekonstrukce digitálních hologramů má pozoruhodné výhody: simulace reálné rekonstrukce je možná, ale nikoli nezbytná. Na počítači lze totiž přímo spočítat fázovou mapu [10], která umožňuje přímé určení vektoru deformace pro každý bod povrchu předmětu, a to bez potřeby lokalizace polohy interferenčního obrazce.

V optimálních podmínkách se digitální holografická interferometrie provádí užitím speciálních CCD polí, která jsou přímo vložena do optického interferenčního pole. Hlavním výhodou varianty holografické interferometrie, vyvinuté v naší optické laboratoři, spočívá v tom, že ji lze provozovat i bez specializovaného vybavení užitím běžného digitálního fotoaparátu, a to dokonce fotoaparátu s neodnímatelným objektivem (obvykle označovaným kompaktně).

4.5 Interpretace interferogramu v klasické holografické interferometrii

Interferometrické výsledky můžeme získat:

1. pomocí klasické interpretace interferogramu užitím povrchu lokalizace interferenčního obrazce (tj. klasickým vyhodnocením s tím, že musíme nalézt povrch lokalizace interferogramu).
2. přímo v případě rekonstrukce digitálního hologramu užitím postupu popsaného v podkapitole 4.6.

Tato podkapitola je věnována interpretaci interferogramů ([1]) získaných v klasické holografické interferometrii, kdy hologramy jsou rekonstruovány světlem v optické laboratoři. Posunutí nebo/a deformace předmětu jsou vepsány do interferogramu, který překrývá obraz předmětu. To je způsobeno (čili ta informace o posunutí či deformaci je tam vepsána proto) fázovým rozdílem mezi světelnými paprsky přicházejícími do konkrétního bodu pozorování (např. našeho oka) z povrchu předmětu v jeho dvou různých stavech (původním a deformovaném či posunutém). Tyto proužky (tj. proužky interferogramu) jsou popsány funkcí lokalizace proužků $\Delta\varphi$, jejíž konstantní hodnota určuje lokalizaci proužků na povrchu předmětu. Tato lokalizační funkce může být ve vztahu ke změnám délek optických drah světla, takže vztah mezi deformací a funkcí popisující lokalizaci proužků musíme nalézt.

Můžeme vyjít z obrázku 4.1 v němž se světelný paprsek ze zdroje S se odráží od předmětu v jeho stavu číslo jedna a směřuje do bodu H hologramu. Deformací a/nebo posunutím předmětu do stavu dvě je dráha tohoto paprsku změněna na SO_2H . Ve vzduchu je optická dráha našeho paprsku ve stavu i , $i = 1, 2$

$$L_i = |\overrightarrow{SO_i}| + |\overrightarrow{O_iH}|. \quad (4.1)$$

Změna optické dráhy je

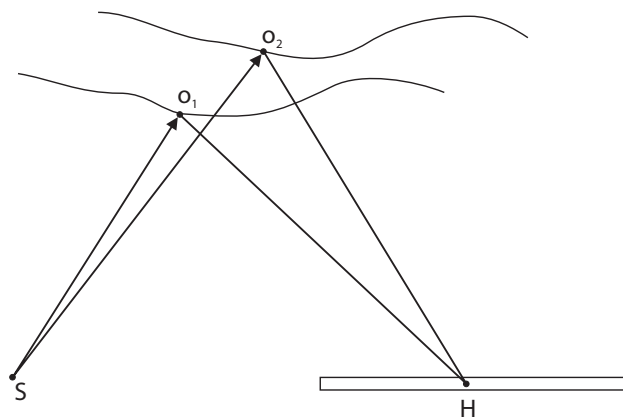
$$\Delta l = L_2 - L_1. \quad (4.2)$$

Protože změna dráhy Δl je ke změně fáze ve vztahu $\Delta l = 2\pi/\lambda$, můžeme pro změnu fáze psát

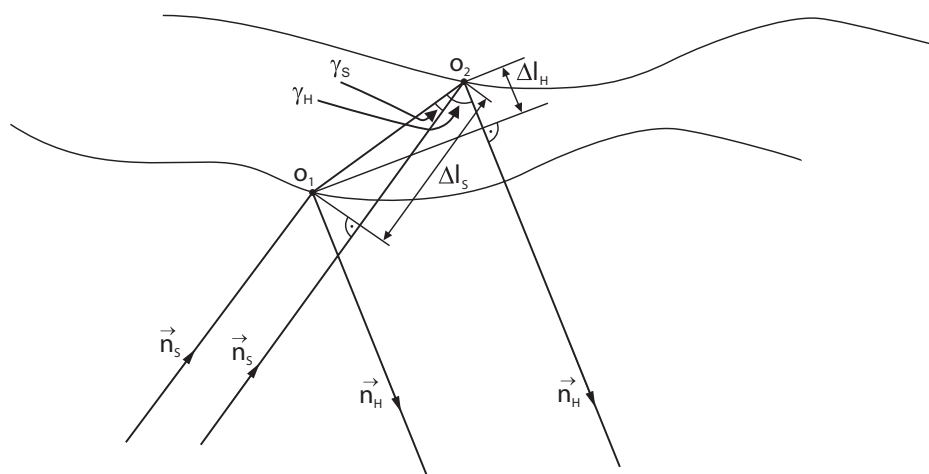
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda(L_2 - L_1)}. \quad (4.3)$$

Tato obecná rovnice není ve tvaru vhodném pro numerické využití. Budeme-li předpokládat, že velikost posunutí $|\overrightarrow{O_1O_2}|$ je mnohem menší než obě vzdálenosti mezi předmětem a hologramem, pak lze směry osvětlení a pozorování pokládat za stejné.

Charakterizujme (viz obr. 4.2) jednotkovým vektorem \vec{n}_S směr $\overrightarrow{SO_2}$ a



Obrázek 4.1: Interpretace interferogramu. Světelný paprsek ze zdroje S se odráží od předmětu v jeho stavu číslo jedna v bodě O_1 a směřuje do bodu H hologramu. Deformací a/nebo posunutím předmětu se předmět dostane do stavu číslo dvě, čímž se paprsek změní tak, že jde po dráze SO_2H .



Obrázek 4.2: Zavedení jednotkového vektoru osvětlení \vec{n}_S a směru pozorování \vec{n}_H , vyjádření optického dráhového rozdílu $L_2 - L_1$ pomocí složek vektorů do obou uvedených směrů.

vektorem \vec{n}_H směr $\overrightarrow{O_2H}$. Protože obraz používaný v klasické holografické interferometrii je virtuální, závisí směr $\overrightarrow{O_2H}$ na poloze bodu pozorování. Podle obrázku 4.2 může být změna optických drah $L_2 - L_1$ vyjádřena pomocí složek v obou směrech

$$L_2 - L_1 = \Delta l_S + \Delta l_H, \quad (4.4)$$

kde

$$\Delta l_S = \left| \overrightarrow{O_1O_2} \right| \cos \gamma_S = \vec{n}_S \cdot \overrightarrow{O_1O_2}, \quad (4.5)$$

$$\Delta l_H = \left| \overrightarrow{O_1O_2} \right| \cos \gamma_H = \vec{n}_H \cdot \overrightarrow{O_1O_2}. \quad (4.6)$$

Takže změna fáze, způsobená posunutím $|\mathbf{O}_1\mathbf{O}_2|$, je

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_S - \vec{n}_H) \cdot \overrightarrow{O_1O_2}. \quad (4.7)$$

Jsou-li body S a H v konečné vzdálenosti od předmětu, budou se směry osvětlení a pozorování (\vec{n}_S and \vec{n}_H) pro povrch předmětu měnit (budou záviset na tom, kde se bod, jehož změnu polohy vyhodnocujeme, na povrchu předmětu nachází). Citlivost celé této metody - daná posunutím na jeden proužek - je potom pro povrch předmětu různá bod od bodu, ale pro malé předměty a smysluplné vzdálenosti k bodovému zdroji a bodu pozorování, může být tato změna citlivosti zcela malá.

Protože fázové změny jsou pro povrch předmětu nahodilé, pouze vlny z odpovídajících si bodů v obou interferujících vlnách efektivně přispívají ke vzniku interferenčních proužků. Pro určité směry pozorování je fázový rozdíl $\Delta\varphi$ mezi vlnami z dvojice bodů O_1, O_2 dán vztahem 4.7. Tento fázový rozdíl se proto bude měnit dle směru pozorování, přitom rozsah možných směrů pozorování je dán aperturou (velikostí otvoru) pozorovací čočky či objektivu. Výsledkem pak je ztráta kontrastu proužků (ztráta je tím větší, čím je větší apertura pozorovací čočky, ztrátu tedy omezíme zmenšením apertury pozorovací čočky). Je však možné najít rovinu, ve které jsou změny $\Delta\varphi$ minimální v rozsahu směrů pozorování, tato rovina se nazývá rovinou lokalizace (interferenčních) proužků. Poloha roviny lokalizace závisí na apertuře pozorovací čočky či objektivu a typu posunu či deformace.

Jestliže je rovina (povrch) lokalizace příliš daleko od povrchu předmětu, pak není možné provést přesnou identifikaci mezi bodem na interferenčním proužku a bodem na předmětu (jinými slovy pak nevíme, který bod na povrchu předmětu patří zvolenému bodu na interferenčním proužku). Pro korektní a správnou interpretaci interferogramu, musí být interferogram lokalizován na povrchu předmětu. Řešením je použití dostatečně malé pozorovací apertury (s dostatečně velkým f), pak je možno pozorovat jasné a zřetelné

interferenční proužky a určit deformaci či posun předmětu (protože interferogram je na povrchu předmětu či v jeho těsné blízkosti a tak lze provést vzájemné přiřazení mezi body proužků a předmětu).

4.6 Přímé určení intenzity a fáze v digitální holografické interferometrii

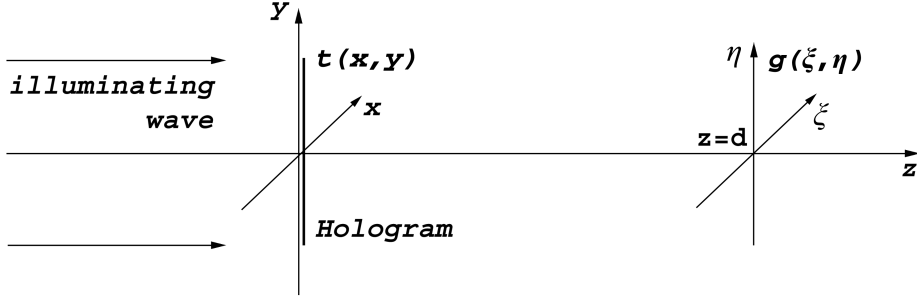
Fundamentální článek, který se týká přímého určení amplitudy a fáze v digitální holografii a interferometrii, napsal Ulf Schnars [10]. Autor sám píše, že jeho nová metoda je určena pro hologramy, které užitím CCD zaznamáme za podmínky, že obraz je na CCD vytvořen bez použití jakékoli čočky či jiného zobrazovacího zařízení, což jinými slovy znamená, že CCD prvek je přímo vložen do interferenčního pole, které vzniká při rekonstrukci hologramu nebo v interferometrii. V laboratořích Ústavu fyziky jsme použití metody rozšířili i na situace, kdy v uspořádáních čočky a objektivy použity jsou (viz [24]). Právě citovaná publikace ukazuje, že intenzita, stejně jako fáze, může být spočtena z digitálního hologramu (i digitálně navzorkovaného hologramu), takže srovnání fází odpovídající nedeformovanému a deformovanému stavu předmětu vede k interferometrickému určení příslušné deformace.

Předpokládejme, že Fresnelovy hologramy (kupříkladu), reprezentující nedeformovaný a deformovaný stav předmětu, jsou užitím CCD zaznamenány a uloženy na počítačovém disku. Protože by neměly být použity žádné čočky a podobně, odpovídá uspořádání pro záznam hologramů tomu, co je na obrázku 3.3. Z digitálně zaznamenaného hologramu může být rekonstruován reálný obraz tak, že výpočtem provedeme difrakci rekonstrukční vlny na hologramu (jinými slovy fyzickou difrakci světla na hologramu nahradíme difrakcí provedenou výpočtem užitím příslušných vztahů z teorie ohybu).

Základem výpočtu je Fresnel-Kirchhoffův integrál, při výpočtu předpokládáme (viz obrázek 4.3), že vzdálenost d mezi hologramem (umístěným v rovině (x, y)) a reálným obrazem (vytvořeným v rovině (ξ, η)) je mnohem větší než rozměry CCD čipu

$$d^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right]_{\max}^2. \quad (4.8)$$

V praxi je tato podmínka obvykle splněna. Potom může být pro výpočet komplexní amplitudy vlny, difragované na hologramu s amplitudovou propustností $t(x, y)$, použita Fresnelova aproximace (viz obrázek 4.3). Užitím rovinné rekonstrukční vlny s reálnou amplitudou a a vlnovou délkou λ , která



Obrázek 4.3: Uspořádání pro rekonstrukci navržené v [10]. Vzdálenost d mezi hologramem s amplitudovou propustností $t(x, y)$ (umístěném v rovině (x, y)) a reálným obrazem (vytvořeným v rovině (ξ, η)) musí být mnohem větší než rozměry CCD čipu.

se šíří podél osy z , je komplexní amplituda reálného obrazu:

$$\begin{aligned}
 g(\xi, \eta) &= \frac{ia}{\lambda d} \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2) \right] \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2) \right] \\
 &\times \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta) \right] dx dy.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Komplexní amplituda $g(\xi, \eta)$ může být digitalizována, je-li propustnost hologramu $t(x, y)$ vyjádřena (tj. de facto pouze aproximována) svými hodnotami na pravoúhlém rastru (tj. na pravoúhlé mřížce bodů, to pro jednoduchost) matice $N \times N$ bodů, nechť Δx and Δy jsou délky kroků podél souřadnic. Potom souřadnice x a y mohou být nahrazeny pomocí $k\Delta x$ a $l\Delta y$, kde k a l jsou celá čísla ležící v intervalu $\langle 0, N - 1 \rangle$. Obdobně souřadnice ξ a η mohou být nahrazeny užitím $m\Delta\xi$ a $n\Delta\eta$, kde m a n jsou opět celá čísla z intervalu $\langle 0, N - 1 \rangle$

$$\begin{aligned}
 g(m, n) &= \frac{ia}{\lambda d} \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta\xi^2 + n^2 \Delta\eta^2) \right] \\
 &\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} t(k, l) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \right] \\
 &\times \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (k\Delta x m\Delta\xi + l\Delta y n\Delta\eta) \right],
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

kde $m = 0, 1, \dots, N - 1$; $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Je-li hologram zaznamenáván přímo CCD čipem, pak se automaticky vytváří dvourozměrná matice sestávající z $N \times N$ pixelů (opět pro jednoduchost)

a je přirozené výše zavedené kroky Δx a Δy (viz rovnici 4.10) ztotožnit s velikostmi pixelů v příslušných směrech.

Rovnice 4.10 tedy popisuje rozložení komplexní amplitudy reálného obrazu. Hodnoty $m\Delta\xi$ a $n\Delta\eta$ mohou být vzaty jako velikosti pixelů rekonstruovaného obrazu. Použitím vztahů ([10])

$$\Delta\xi = \lambda d / N \Delta x \quad (4.11)$$

$$\Delta\eta = \lambda d / N \Delta y \quad (4.12)$$

rovnice 4.10 přechází na tvar

$$\begin{aligned} g(m, n) = & \frac{ia}{\lambda d} \exp \left[-i\pi \lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2} \right) \right] \\ & \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} t(k, l) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \right] \\ & \times \exp \left[i2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Z numerického hlediska je rovnice 4.13 vyjádřením inverzní diskrétní Fourierovy transformace funkce

$$\tilde{t}(k, l) \equiv t(k, l) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \right]. \quad (4.14)$$

Při výpočtu této transformace může být využito algoritmu standardní rychlé Fourierovy transformace (FFT). Člen před sumou v rovnici 4.13 je pouze multiplikatívni konstantou.

Důležité je, že rekonstruované vlnové pole $g(\xi, \eta)$ nebo $g(m, n)$ je komplexní funkcí, takže může být spočtena jak intenzita, tak fáze. Tato skutečnost je v kontrastu s rekonstrukcí světlem, při níž je viditelná pouze intenzita. V našem případě můžeme intenzitu spočítat z komplexní amplitudy užitím vztahu 4.13 tak, že vezmeme jeho absolutní hodnotu a provedeme dvojmoc

$$I(m, n) = |g(m, n)|^2 = \text{Re}^2 [g(m, n)] + \text{Im}^2 [g(m, n)], \quad (4.15)$$

Re značí reálnou část a Im imaginární část. Fázi můžeme spočítat takto

$$\Phi(m, n) = \arctan \frac{\text{Im} [g(m, n)]}{\text{Re} [g(m, n)]}. \quad (4.16)$$

Vezmeme-li v úvahu znaménka $\text{Im} [g(m, n)]$ a $\text{Re} [g(m, n)]$, leží hodnoty $\Phi(m, n)$ v intervalu $(-\pi, +\pi)$. Obecně nepravidelný povrch předmětu vede k tomu, že fáze se také nepravidelně mění.

V holografické interferometrii jsou zaznamenávány dva hologramy — první s amplitudovou propustností $t_1(k, l)$ zachycuje první stav předmětu (často nedeformovaného), podobně druhý s amplitudovou propustností $t_2(k, l)$ zachycuje druhý stav předmětu (často deformovaného). Zde připomínáme, že při dosazení součtu

$$t(k, l) = t_1(k, l) + t_2(k, l) \quad (4.17)$$

do rovnic 4.13 a 4.15, vede naše numerická rekonstrukce ke klasickému interferogramu metody dvojí expozice. V článku [25] můžeme nalézt jiné metody rekonstrukce.

Nyní pokračujme — protože hologramy jsou uloženy digitálně, je k dispozici také tato nová metoda jejich zpracování: oba hologramy jsou rekonstruovány separátně a fáze je spočtena užitím rovnice 4.16 pro každý stav předmětu. Rozdíl těchto dvou fází, nazývaný fáze interference či interferenční fází, může být vyčíslen vztahy

$$\Delta\Phi(\xi, \eta) = \begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 & \text{if } \Phi_1 \geq \Phi_2 \\ \Phi_1 - \Phi_2 + 2\pi & \text{if } \Phi_1 \leq \Phi_2 \end{cases}, \quad (4.18)$$

kde Φ_1 and Φ_2 jsou fáze obou stavů předmětu (opět např. nedeformovaného a deformovaného předmětu). Popisovaný postup umožňuje spočítat interferenční fázi přímo z digitálních hologramů. Klasické vyhodnocení interferogramu, charakteristické pro konvenční holografickou interferometrii, tak není zapotřebí.

Experimentální uspořádání, které použil Schnars [10] (viz obr. 3.3), se liší od našeho právě popsaného uspořádání - viz [25]. Mezi oběma uspořádáními jsou dva hlavní rozdíly:

1. In [10] předmětová i referenční vlna dopadá přímo na CCD čip, ale v našem uspořádání světlo před dopadem na CCD navíc prochází několika čočkami či objektivy. To dává možnost vhodných úprav interferenčního pole před vlastním záznamem na CCD. Protože autor [10] uváděl, že jeho teorie přímého určení fáze v holografické interferometrii je použitelná pouze tehdy, nejsou-li použity žádné čočky či objektivy, je postupem užitým v [25] použitelnost jeho metody rozšířena.
2. Původně [10] byly používány pouze monochromatické (256 úrovní šedi) CCD. V [24], [25] byly použity barevné CCD čipy, což nicméně přináší jisté problémy, kterými bylo nutno se zabývat - viz [24], [25].

Experimentálním výsledkem v [10] je: pouze malá část předmětu o velikosti asi 2 cm je zaznamenána v jeho deformovaném a nedeformovaném stavu. Pro každý stav předmětu je fáze přímo spočtena užitím rovnic 4.16,

4.13 a potom — užitím 4.18 — je určena interferenční fáze. Užitím postupu dle [24], [25] mohou být digitálně zaznamenány předměty až do velikosti asi 8 cm.

Kapitola 5

Interferometrie při ochraně uměleckých děl

5.1 Holografická interferometrie při ochraně uměleckých děl

Velmi užitečnou aplikací holografické interferometrie je její využití při ochraně uměleckých děl. Protože holografická interferometrie má vysokou citlivost na jakékoli změny povrchu předmětu, je užitečnou metodou při získání významných informací o strukturálních změnách předmětu a jeho celkovém stavu sledováním povrchových změn předmětu, je-li tento podroben napětí. Jinými slovy, informace o stavu předmětu v celém jeho objemu se získává tak, že zavedením napětí se informace o struktuře a stavu předmětu projeví na jeho povrchu pohybovými změnami, které zachytíme a analyzujeme. Holografická interferometrie nabízí mnoho nedestruktivních inspekčních metod, při jejichž použití se zájmové parametry - např. praskliny, trhliny, dutiny, odloupení či rozštípnutí vrstvy - projeví jako diskontinuity (chcete-li nepravidelnosti) deformací povrchu předmětu. Tyto nepravidelnosti se v interferogramu projeví lokálními anomáliemi, tj. nápadnými odlišnostmi, v rozložení interferenčních čar, což právě umožňuje nalézt vady předmětu [1].

Za tím účelem je třeba navrhnout takové techniky, že anomálie uvnitř předmětu (což bývají hledané vady způsobené stárnutím předmětu) se projeví změnami na jeho povrchu, které můžeme detekovat. Obvykle se používají metody, které vyvolají stress čili vnitřní pnutí v předmětu a přitom předmět nijak nepoškodí. Častou metodou je např. postup, kdy užitím infračervené lampy (infračerveného zdroje tepla) se povrch předmětu ohřeje proudícím vzduchem, což v předmětu vyvolá teplotní změny. Konkrétně to pak vypadá tak, že povrch předmětu je teplejší než podkladové vrstvy pod ním, v

předmětu tím vzniká teplotní gradient. Ten způsobuje, že teplotní délkové i objemové změny jednotlivých vrstev předmětu jsou rozdílné, vnitřní skryté vady způsobí v celé situaci anomálie a tyto anomálie se zpravidla projeví i na povrchu předmětu.

Obecně platí, že umělecká díla jsou analyzována užitím termálního driftu, místo infračervené lampy lze samozřejmě použít proud mírně ohřátého vzduchu. Samotný povrch předmětu se ohřívá jen o několik málo stupňů, rychlost proudění vzduchu se reguluje a pro dosažení optimálních výsledků se s ní experimentuje.

Vyvinutí nejlepší metody a testovací procedury je částečně empirický proces. V úvahu musí být vzata zejména předpokládaná struktura uměleckého díla (obecně předmětu) a povaha očekávaných vad díla. Na základě provedených kalibračních experimentů a prací je odůvodněné předpokládat, že v interferogramu mají proužky vyšší prostorovou frekvenci (jsou blíže u sebe) v těch místech struktury předmětu, v nichž se napětí koncentruje.

První holografické výzkumy v diagnostice uměleckých děl byly provedeny v roce 1971. Jsou známy experimenty provedené v Benátkách v r. 1972, tyto práce demonstrovaly schopnosti holografie v terénu. Příkladem detailního a přesného studia maleb na deskách jsou experimenty, které provedli Amadesi, Gori, Grella and Guattari v r. 1974 [5]. V těchto pracech byly přípravné experimenty provedeny na modelech simulujících skutečné malby na deskách. Byla zvolena dvouvrstvá struktura, která odpovídá (podkladovým) podpůrným vrstvám starých maleb. Uvnitř modelů byla (úmyslně) místa s vadami (např. odchlípnutí vrstvy od podkladu pod ní), jejichž poloha, tvar i velikosti byly tedy předem známy. Simulace míst s vadami byla provedena vložením vhodných kousků plastu. Interferogramy, ilustrující tyto úvodní experimenty, jsou dostupné v [5]. Na těchto interferogramech jsou odloupnutá místa odhalena (tj. vady nalezeny) zřetelnými ostrůvky proužků (lišících se od okolí).

Následně byly v laboratoři analyzovány staré malby z 15. století - konkrétně Svatá Kateřina (Santa Catarina) od Piera Francesco Fiorentina z roku asi 1450 - holografickou interferometrickou metodou dvojí expozice. Dřevěný panel malby sestává z opory (dva plátky topolového dřeva slepené k sobě), hlavní vrstvy směsi sádry a lepidla a vlastní malby. Konkrétní, metodou dvojí expozice zhotovený interferogram tohoto uměleckého díla, je k dispozici v [5]. Interferogram byl sejmut tak, že mezi oběma expozicemi byla provedena změna teploty předmětu (malby) ohřátím povrchu prouděním mírně ohřátého vzduchu. Výsledkem je, že můžeme pozorovat, že mnoho nesoudržností či odchlípnutí (odhalených shlukem deformovaných proužků) ve struktuře malby se nachází podél čáry ve svislém směru, což odpovídá místu spojení dvou dřevěných částí tvořících oporu. Některá odchlípení umístěná mezi vrstvami, nacházející se ve vznikajícím (či počátečním) stádiu, by nebylo možno

odhalit pouhým okem.

Samozřejmou otázkou je, zda anomálie v rozložení proužků skutečně odpovídají vadám ve struktuře díla (tj. např. odloučující se místům, dutinám, trhlinám apod.). Abychom tuto otázku zodpověděli, byla některá díla injekčně restaurována vhodným lepidlem. Holografické testy byly provedeny jak před restaurací (opravě) díla, tak po ní. Ve všech případech byly anomálie v rozložení proužků podstatně redukovány nebo zcela vymizely. To platilo zvláště pro ta umělecká díla, jejichž podpůrné vrstvy měly nižší tloušťku. Příkladem těchto testů může být odkaz [15], v němž je zkoumána malba na desce s názvem *Madonna della Misericordia* z Peruginovy školy. Interferogramy ilustrují jak původní situaci (tj. defekty před restaurováním), tak situaci po restauraci. Vidíme, že některé defekty (odchlípnutí či odtržení od podkladu) byly opraveny, jiné nikoli - ty potřebují novou opravu.

Docházíme k závěru, že holografická interferometrie je schopna studovat všechny umělecké předměty, které odrážejí či rozptylují světlo (nebo jimi světlo prochází). Výše uvedené experimenty totiž ukázaly, že holografická interferometrie dokáže spolehlivě nalézt místa, velikosti a typy defektů uměleckých děl. Následně lze přistoupit k restauraci díla.

Přes zjevné výhody, kterou holografická 3D interferometrie má, je její rutinní využití při diagnostice stavu uměleckých děl omezené. K této skutečnosti přispívají tyto faktory:

- Často je nezbytné převést zkoumaný předmět do optické laboratoře, protože požadavky na stabilitu celého uspořádání, v němž se diagnostika uměleckého díla provádí, jsou velmi přísné. Obecně totiž platí, že stabilita celého zařízení, a to včetně okolí, pokud by se předmět nacházel in situ, musí být alespoň $\lambda/8$ nebo lepší. Při použití kontinuálního laseru (např. He-Ne či pevnofázových laserů, které máme v optické laboratoři Ústavu fyziky naší univerzity) je expoziční doba jednoho hologramu řádově sekundy či desítky sekund. Z toho vyplývá, že pro kvalitní záznam (a následně obraz) musí být stabilita během expozice lepší než $0,1\mu\text{m}$. Proto je holografie standardně prováděna na vibračně izolovaném těžkém stole, tj. stole, který je konstruován tak, aby vibrace z okolí co nejvíce tlumil. Takový stůl je zpravidla tvořen těžkou ocelovou deskou tloušťky více než 1cm , která je zespodu ještě vyztužena příčnými žebry (nosníky). Celá tato deska je pak pružně uložena na pískových a vzduchových polštářích. Je samozřejmě také možné, místo kontinuálního laseru použít laser pulsní, ale ani tato varianta není jednoduchá. Pulsní lasery dostatečných výkonů a koherence jsou drahá zařízení, která navíc vyžadují externí a často vodou chlazené napájecí zdroje, takže k vysoké ceně přistupuje značná hmotnost a velikost ta-

kového zařízení.

- Vysoká cena holografických systémů, a to zvláště v případě, je-li zvolena klasická holografie (u níž se rekonstrukce provádí fyzicky světlem).
- Časově náročný proces mokrého zpracování hologramů v případě použití klasické stříbrné halogenidové emulze.

S ohledem na výše uvedené nevýhody (týkající se spíše klasické laboratorní holografické interferometrie) by měly mít větší šance kompaktní aparatury využívající digitální holografickou interferometrii a elektronickou speckle interferometrii (tj. skvrnovou interferometrii, za vhodnější pokládáme výraz speckle ponechat v originále).

5.2 Principy elektronické speckle interferometrie

Již v předchozích částech tohoto textu jsme uvedli, že v případě této varianty interferometrie budeme raději používat výraz *speckle* než možný český překlad flíčková, skvrnová, tečkovaná nebo kropenatá interferometrie.

Dobrý přehled elektronické speckle interferometrie je v [1]. Předpokládejme, že difuzně odrážející povrch předmětu osvětlíme koherentním světlem. Pak osvětlený povrch předmětu vypadá jako by byl pokrytý soustavou jasných a tmavých skvrn — flíčků (nebo-li - řečeno anglicky - je na něm speckle pattern). Čím je to způsobeno a jak přesně flíčky vypadají? Je to právě důsledek osvětlení předmětu koherentním světlem (víme přece, že v běžném životě na osvětlených předmětech nic takového nepozorujeme). Speckle jsou v prostoru i na povrchu předmětu rozloženy náhodně. Vznikají proto, že sousední mikroskopické elementy předmětu produkují (odražené) světelné vlny, jejichž fáze se bod od bodu povrchu předmětu mění. Pro nepravidelný (tak tomu obecně je) povrch předmětu potom do každého bodu, z něhož můžeme předmět pozorovat, přichází světelné vlny všech možných fází. Tyto vlny jsou alespoň částečně koherentní, takže spolu vzájemně interferují. Ze základů optiky je známo, že při interferenci koherentních vln je výsledná amplituda (v bodě pozorování) dána součtem komplexních amplitud všech vln (naproti tomu v běžném životě se až na naprosté výjimky skládají vlny nekoherentní a výsledná intenzita v bodě pozorování je dána pouhým součtem intenzit všech vln - to je zásadní rozdíl oproti interferenci koherentních vln). Protože každá dílčí komplexní amplituda interferujících koherentních vln může být reprezentována příslušným vektorem, může být součtem komplexních amplitud vektor jak s maximální možnou velikostí, tak vektor nulový. V případě,

kdy je součtem vektor nulový, vidíme (z našeho místa pozorování) v daném místě na povrchu předmětu tmavé místo (nemůžeme napsat tmavý bod, protože pozorovaný útvar se při pozorování jeví spíše jako tmavá tečka či skvrnka), zůstaňme u toho, že vidíme tmavou tečku. V opačném případě, kdy součet komplexních amplitud odpovídá konstruktivní interferenci (použili jsme termín známý ze základů vlnové optiky), vidíme na povrchu předmětu světlou tečku. Pro jistotu připomínáme, že vše je v monochromatickém světle, tj. jde o různě jasné červené tečky, je-li např. použit náš He-Ne laser, jehož $\lambda = 632,8$ nm. Tímto právě popsaným způsobem vznikají na povrchu předmětu speckle - tečky či flíčky, často se mluví o podivném, matoucím či pro oči nepříjemném osvětlení předmětu. Optici ovšem vědí, proč předmět osvětlený koherentním světlem nemůže vypadat jinak.

Co je však podstatné, naprostá většina odborníků, zabývajících se holografii, zastává názor, že tečky (lépe asi opravdu speckle) obsahují informace o povrchu předmětu i jeho deformaci. Z toho, jak speckle vznikají, lze totiž oprávněně usuzovat, že již pouhou analýzou (či pozorováním) specklů lze vyhodnocovat, jak přesně povrch předmětu vypadá. Pokud bychom chtěli totéž říci užitím matematických pojmů, pak lze analýzou specklů najít funkci, která je matematickou rovnicí povrchu předmětu (v kartézském prostoru by se jednalo o funkci dvou proměnných $z = f(x, y)$). Dojde-li k deformaci předmětu, lze analogicky najít funkci popisující deformovaný povrch předmětu a tak deformaci celého povrchu předmětu určit. Praxe ovšem ukazuje, že analýza specklů na osvětleném předmětu není jednoduchá, takže byla vyvinuta metoda, která vyhodnocení specklů podstatně zjednoduší - o tom v dalších odstavcích.

Abychom získali informace, obsažené ve speckles, využijeme principy holografie a holografické interferometrie. Zkombinujeme výše popsaný tečkovaný (speckle pattern image) obraz předmětu s referenční vlnou a dostaneme nové stádium tečkovaného obrazu, tj. speckle obraz v podobě, která je kombinací původního tečkovaného osvětlení předmětu a referenční vlny. I tato kombinace obsahuje hledané informace o povrchu zkoumaného předmětu, jelikož náš tečkovaný (speckle) obraz je v ní obsažen. Protože prostorové frekvence speckle obrazu a referenční vlny jsou jen málo odlišné, jsou prostorové frekvence nového speckle obrazu podstatně nižší. To je samozřejmě dáno tím, že časové frekvence vlny, kterou osvětlujeme předmět a která na něm vytváří speckle obraz, a reference jsou přesně stejné, a zejména tím, že tečky tečkovaného obrazu nejsou bodové (není matematicky správně, když napíšeme, že jsou mnohem větší než bodové). Protože prostorové frekvence nového speckle obrazu jsou mnohem nižší než prostorové frekvence interferenčních polí v klasické holografii, můžeme pro záznam nového speckle obrazu použít současné TV kamery. Tím začal rozvoj nové efektivní holografické

metody zvané česky snad elektronická interferometrie tečkovaného obrazu, mnohem prozíravější je držet se anglického originálu electronic speckle pattern interferometry, pro který se obvykle používá pouze zkratka ESPI (této zkratky v označení metody se dále budeme držet).

ESPI bývá také označována jako TV-holografie. Tato metoda, která produkuje interferometrická data bez použití tradičních holografických záznamových postupů, byla vyvinuta na počátku 70. let minulého století ([1]). ESPI, často kategorizovaná jako laserová speckle metoda, může být klasifikována jako kombinace holografie a speckle interferometrie, ve které je místo holografického filmu (obecně prostředí pro záznam hologramů) použita TV kamera. Čip kamery samozřejmě neumožňuje optickou rekonstrukci světlem, to je stejné jako u digitální holografie. Principiálně ESPI sestává z těchto kroků:

1. Záznam je z čipu kamery převeden na videosignál.
2. Tento video signál je elektronicky zpracován na snímky.
3. Výsledný signál je zobrazen na monitoru nebo TV (dále jen na TV obrazovce, tj. TV).

Co je důležité — na TV obrazovce jsou změny v textuře speckle obrazu konvertovány na změny jasu. Navíc je získaný obraz zcela ekvivalentní holograficky rekonstruovanému obrazu a má tutéž interferometrickou citlivost. Na závěr zopakujme hlavní výhodu — obraz obsahuje jen nižší prostorové frekvence.

Užitím TV kamery dostáváme - dle evropského standardu - na TV obrazovce 25 snímků každou sekundu. To znamená, že máme k dispozici 25 zaznamenaných a rekonstruovaných hologramů každou sekundu za předpokladu, že relativně krátký expoziční čas 40 ms zaručí dostatečně koherentní osvětlení předmětu. Pokud ano, pak tato krátká expozice přispívá k lepší interferometrické stabilitě celého ESPI uspořádání.

Nyní budeme pokračovat matematickým vyjádřením principů celé metody. Výpočet není proveden do všech detailů, ale pro porozumění principům metody podle našeho názoru zcela postačuje. Případné zájemce o podrobnější rozbor odkazujeme na literaturu [4].

Předpokládejme tedy, že předmět je osvětlen koherentním světlem, takže na jeho povrchu vznikají v rozptýleném světle speckles, tj. vidíme světlé a tmavé tečky. Zobrazme osvětlený povrch objektivem (čočkou), čímž dostaneme obraz předmětu včetně speckles (dostaneme obraz předmětu včetně tečkování). Potom — analogicky jako v holografii — zkombinujeme obraz předmětu vytvořený objektivem (čočkou) s referenční vlnou (tím, že obě

vlny optickou cestou převedeme to téhož místa v prostoru). Obě vlny spolu interferují zpravidla v obrazové rovině zmíněného objektivu (čočky), čímž se zrodí nový speckles obrazec (tj. nový tečkovaný obrazec).

Označme ve zvoleném bodě (x, y) obrazové roviny: komplexní amplitudu předmětového speckle obrazce jako $o(x, y)$ a podobně komplexní amplitudu referenční vlny jako $r(x, y)$. Zavedené amplitudy mohou být vyjádřeny takto

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp [i\varphi(x, y)] = |o| \exp (i\varphi), \quad (5.1)$$

$$r(x, y) = |r(x, y)| \exp [i\psi(x, y)] = |r| \exp (i\psi), \quad (5.2)$$

kde $|o(x, y)|$ a $|r(x, y)|$ jsou reálné amplitudy světelných vln a $\varphi(x, y)$ a $\psi(x, y)$ jsou jejich fáze. Potom je výsledná celková intenzita nového speckle obrazce v obrazové rovině rovna

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= |o(x, y) + r(x, y)|^2 \\ &= |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + o^*(x, y) r(x, y) + o(x, y) r^*(x, y), \end{aligned} \quad (5.3)$$

kde $*$ značí komplexní konjugaci. Rovnice 5.3 může být vyjádřena ve tvaru

$$I_1(x, y) = |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + 2|o(x, y)||r(x, y)| \cos [\varphi(x, y) - \psi(x, y)]. \quad (5.4)$$

Můžeme předpokládat, že rovnice 5.4 popisuje nedeformovaný stav předmětu (stav číslo jedna). Je-li povrch předmětu posunut či deformován do stavu dvě, změní se také předmětový speckle obrazec. Je-li posunutí a jeho gradient dostatečně malé, můžeme uvažovat tak, že všechny složky, směřující do libovolného obrazového bodu z takové plošky předmětu, jejíž velikost odpovídá speckles rozlišení, změní své fáze o tutéž hodnotu rovnou $\Delta\varphi(x, y)$. Potom se po malém statickém posunutí/deformaci předmětu změní intenzita v bodě (x, y) na I_2 takto

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &= |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 \\ &+ 2|o(x, y)||r(x, y)| \cos [\varphi(x, y) - \psi(x, y) - \Delta\varphi(x, y)]. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Jestliže fázová změna není příliš velká, může být vztah mezi intenzitami I_1 a I_2 nalezen sečtením nebo odečtením rovnic 5.4 a 5.5. Častěji se používá odečet obou rovnic, jelikož proužky mají mnohem lepší viditelnost než při sečtení rovnic. Odečet probíhá tak, že speckle obrazec s intenzitou I_1 je fokusován čočkou na CCD čip TV kamery, videosignál V_1 odpovídající I_1 je digitalizován a uložen na počítači. Živý videosignál V_2 odpovídající I_2 je potom odečten od videosignálu V_1 — tím dostaneme videosignál V_S . Čtverec tohoto výsledného videosignálu, tj. jeho intenzita, je pak zobrazena na TV

obrazovce, kde pozorujeme živé korelační interferenční proužky. Celý proces pak může být popsán následovně

$$V_S = (V_1 - V_2)^2 \propto (I_1 - I_2)^2 = n(x, y) E(x, y), \quad (5.6)$$

kde

$$n(x, y) = 8 |o(x, y)|^2 |r(x, y)|^2 \sin^2 \left\{ [\varphi(x, y) - \psi(x, y)] + \frac{1}{2} \Delta\varphi(x, y) \right\} \quad (5.7)$$

a

$$E(x, y) = 1 - \cos [\Delta\varphi(x, y)]. \quad (5.8)$$

Diskusí rovnice 5.6 zjistíme, že člen $n(x, y)$ odpovídá šumu, zatímco člen $E(x, y)$ popisuje rozložení proužků. Abychom eliminovali šum, zprůměrujeme rovnici 5.6 přes všechny fáze (over all speckle phases) a dostaneme vztah

$$\begin{aligned} \langle V_S(x, y) \rangle &\propto \langle [I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 \rangle \\ &= 4 \langle |o(x, y)|^2 \rangle \langle |r(x, y)|^2 \rangle \times \{1 - \cos [\Delta\varphi(x, y)]\}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

v němž lomené závorky značí průměrování přes celý soubor. Rovnice 5.9 je analogická s rovnicí charakterizující interferenční proužky v klasické holografické interferometrii a popisuje přesnou korelaci proužků bez speckles, viditelnost proužků je jednotková. Informaci o relativním posunutí různých částí povrchu předmětu můžeme získat proto, že fázová změna $\Delta\varphi(x, y)$ v 5.9 byla zavedena jako funkce, která charakterizuje právě posunutí určité plošky (o velikosti odpovídající rozlišení) povrchu předmětu. Tmavé proužky dostaneme pro

$$\Delta\varphi(x, y) = 2n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5.10)$$

světlé proužky pro

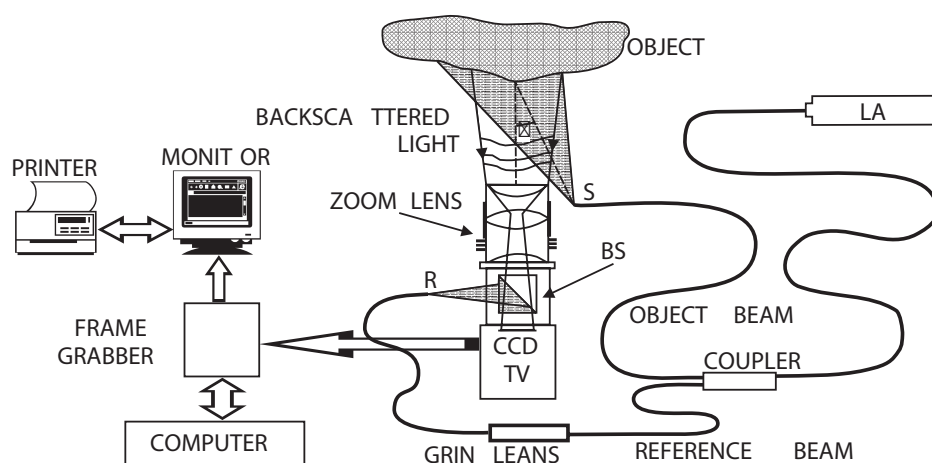
$$\Delta\varphi(x, y) = (2n + 1)\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.11)$$

Užitím rovnic 5.9, 5.10, 5.11 může být získaný interferenční obrazec vyhodnocen metodami klasické holografické interferometrie (viz kapitolu 4.5).

5.2.1 Geometrie v ESPI

Zvolíme-li na povrchu předmětu bod (nebo malou plošku), můžeme rozlišovat dva hlavní druhy deformace povrchu:

- Zvolený referenční bod (ploška) je deformací posunut ve směru normály k povrchu — nastává posunutí z roviny povrchu (v originále out-of-plane displacement). Připomínáme, že normála je přímka, která je v daném bodě kolmá k tečné rovině k povrchu předmětu.



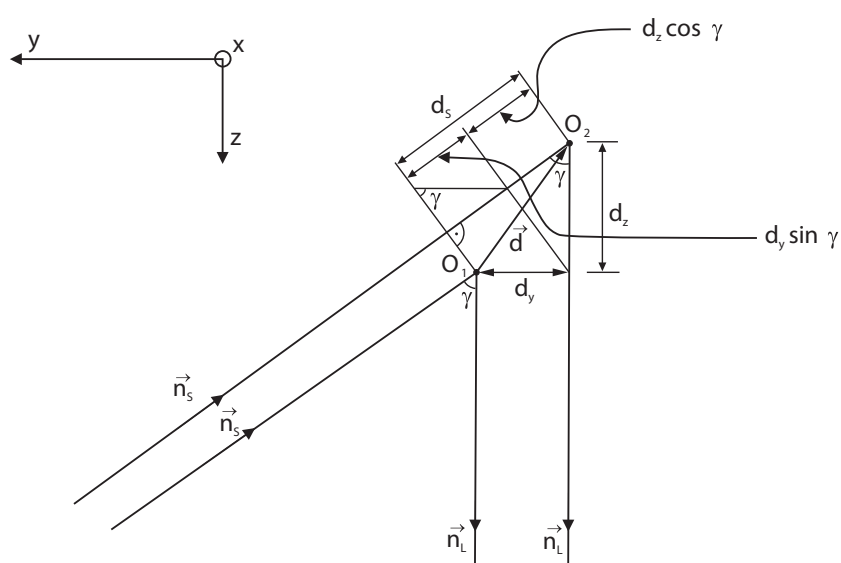
Obrázek 5.1: Interferometr pro měření deformací z povrchu předmětu. Koherentní světlo z laseru LA je navázáno na jednomódové vlákno, obousměrným děličem *Coupler* je rozděleno na předmětový a referenční paprsek. Předmětová vlna z bodového zdroje S dopadá pod malým úhlem γ na předmět označený jako *OBJECT*. Světlo, rozptýlené předmětem, se objektivem *ZOOM LENS* promítne na CCD čip kamery *TV*. Referenční vlna se na CCD čip *TV* kamery přivede pomocí dělicí kostky *BS* umístěné před kamerou.

- Zvolený referenční bod (ploška) je deformací posunut ve směru ležícím de facto v rovině povrchu, přesněji je posunut v tangenciální povrchové rovině (tj. v tečné rovině k povrchu v daném bodě) — dochází k posunutí v rovině (v originále in-plane displacement).

Interferometr, citlivý na posunutí ve směru normály (out-of-plane sensitive interferometer) vidíme na obrázku 5.1. Vzájemně koherentní předmětová a referenční vlna z obrázku 5.1 interferují v rovině CCD čipu kamery a vzniká interferenční obrazec. Přesnou volbou polohy bodového zdroje R referenční vlny můžeme zajistit, že prostorové frekvence na CCD čipu kamery jsou omezeny na hodnoty, které je použitý čip schopen rozlišit.

Nyní můžeme začít s analýzou obecné deformace, vyjděme přitom z obrázku 5.2. Předpokládejme, že vlivem posunutí a/nebo deformace se sledovaný bod předmětu přesunul z původní polohy O_1 do polohy O_2 , pak vektor posunutí je $\overrightarrow{O_1O_2} = \vec{d}$. Dále předpokládejme, že předmět je osvětlen rovinnou vlnou, charakterizovanou vlnovým vektorem \vec{n}_S , a vektor \vec{n}_L určuje směr k pozorovací čočce (objektivu) — ta je v obrázku 5.1 označena jako *ZOOM LENS*. Úhel mezi vektory \vec{n}_S a \vec{n}_L je označen jako γ .

Cesta vedoucí k určení hledaného vektoru deformace \vec{d} začíná stanovením geometrických drah, tj. drah vždy ze zdroje světla přes bod předmětu



Obrázek 5.2: Analýza posunutí ve směru normály z povrchu předmětu užitím ESPI interferometrie. Jednotkový vektor \vec{n}_S určuje směr osvětlení, vektor \vec{n}_L míří směrem k observační čočce. Celkový vektor posunutí \vec{d} může být vyjádřen pomocí posunutí d_z ve směru normály a posunutí d_y v tečné rovině. Jinak řečeno out-of-plane displacement d_z a in-plane displacement d_y jsou složkami vektoru \vec{d} .

(jednou přes bod O_1 , podruhé přes bod O_2) do bodu pozorování. Z obrázku 5.2 vidíme, že rozdíl geometrických drah, odpovídající posunutí $\overrightarrow{O_1O_2}$, je $\Delta l = d_S + d_z$. To odpovídá fázovému rozdílu vln

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (d_S + d_z), \quad (5.12)$$

který můžeme upravit na tvar

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_z (1 + \cos \gamma) + d_y \sin \gamma)]. \quad (5.13)$$

V obrázku 5.13 d_z je normálová složka posunutí (out-of-plane displacement) a d_y je tečná složka posunutí (is in-plane displacement). Posunutí ve směru x (viz zavedení souřadnic v obr. 5.2), které je dle právě zavedené klasifikace také posunutím v tečném směru, nemůže být v použitém uspořádání určeno. To nás ovšem nikterak nepřekvapuje, protože uspořádání dle obrázku 5.1 je přece uspořádáním pro určení posunutí v normálovém směru. Jestliže je osvětlovací úhel γ (obr. 5.1) malý (několik stupňů), může být rovnice 5.13 upravena na tvar

$$\Delta\varphi(x, y) = 2\pi \frac{2d_z}{\lambda}, \quad (5.14)$$

tím dostáváme čistě posunutí ve směru normály (out-of-plane displacement) a podle rovnice 5.10 se v odečtem vzniklém speckle obrazci tmavé proužky vytvoří, jestliže

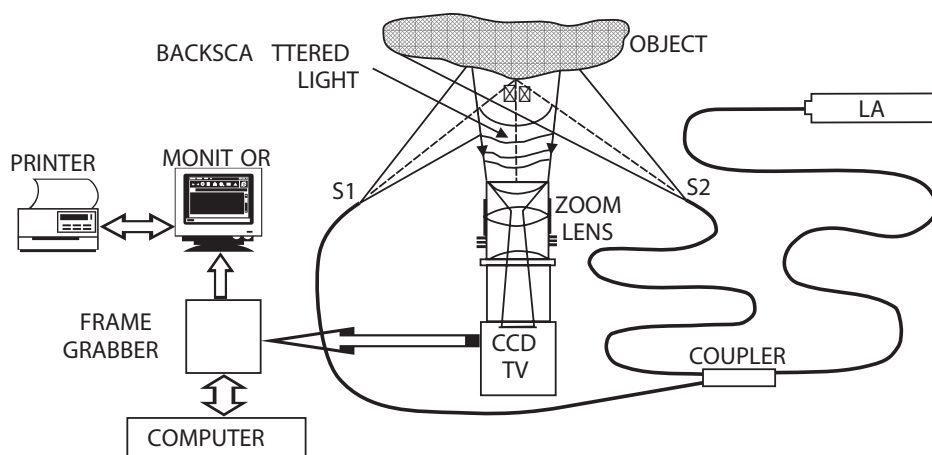
$$d_z = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.15)$$

Docházíme k závěru, že získané proužky zobrazují místa konstantní deformace ve směru normály (tj. místa konstantní out-of-plane displacement).

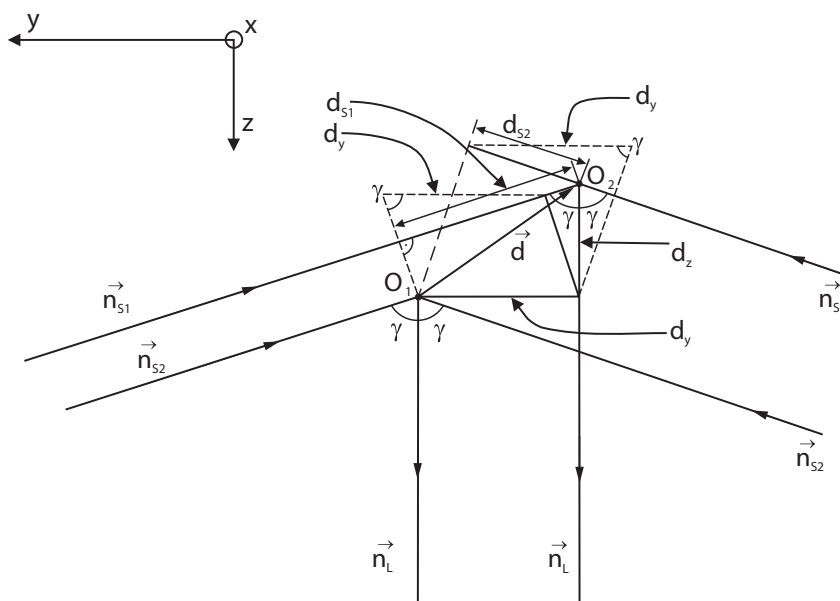
Interferometr, citlivý na posunutí v tečném směru, může být sestaven dle obr. 5.3. Vidíme, že oproti dříve diskutovanému interferometru pro normálová posunutí, nastaly tyto hlavní změny:

- Předmětová vlna (se středním vlnovým vektorem \vec{n}_{S1}) dopadá na povrch předmětu ze strany, tj. pod podstatně větším úhlem γ .
- Referenční vlna (se středním vlnovým vektorem \vec{n}_{S2}) není zavedena užitím pomocné dělicí kostky, nýbrž předmět osvětluje ze strany opět pod úhlem γ .

Speckle obrazec, vytvořený koherentně osvětleným povrchem předmětu, je opět zobrazen čočkou, umístěnou v kolmém směru k povrchu předmětu, na CCD čip TV kamery. Při vyhodnocování změn povrchu předmětu, viz (obr. 5.4), způsobených posunutím a/nebo deformací, budeme opět předpo-



Obrázek 5.3: Interferometr citlivý na posunutí v tečném směru. Toto uspořádání je charakterizováno především mnohem větším úhlem γ dopadu předmětové vlny na předmět. Referenční vlna předmět osvětluje z opačné strany — opět pod tímtož úhlem dopadu γ .



Obrázek 5.4: Analýza posunutí v tečné ESPI interferometrii — vektor \vec{n}_{s1} znázorňuje směr dopadajícího světla, vektor \vec{n}_L ukazuje směr pozorování, \vec{d} je vektor posunutí. Fázovou změnu, odpovídající posunutí \vec{d} , vyjádříme pomocí znázorněných složek

kládat, že náš referenční bod se posunul ze své původní polohy O_1 do nové polohy O_2 (a vektor $\overrightarrow{O_1O_2} = \vec{d}$ je tedy vektorem posunutí). Nyní můžeme vyjádřit změny fází $\Delta\varphi_1(x, y)$, $\Delta\varphi_2(x, y)$ odpovídající oběma směrům osvětlení

$$\Delta\varphi_1(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_z(1 + \cos \gamma) + d_y \sin \gamma)], \quad (5.16)$$

$$\Delta\varphi_2(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_z(1 + \cos \gamma) - d_y \sin \gamma)]. \quad (5.17)$$

Posunutí ve směru x (jde také o tečné posunutí) v tomto uspořádání neurčíme, protože žádnou změnu fáze nezpůsobuje. Pokračováním výpočtu pro relativní fázový rozdíl dostaneme

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (2d_y \sin \gamma), \quad (5.18)$$

takže s ohledem na 5.10 se tmavé proužky vytvoří v odečteném speckle obrazci, pakliže platí

$$d_y = n \frac{\lambda}{2} \sin \gamma, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.19)$$

Tyto tmavé proužky (nezávisle na případném normálovém posunutí) znázorňují místa (vrstevnice) konstantního tečného posunutí. Poznamenejme, že pro konstantní citlivost pro celý povrch předmětu, musí být použité svazky kolimovány. Dále je třeba připomenout, že pro stanovení celkového posunutí v tečné rovině musíme otočit buď zkoumaný předmět nebo osvětlovací vlny o 90° , abychom našli také posunutí ve směru osy x .

Odkazy na různá ESPI uspořádání — citlivá na tečnou a normálovou deformaci — jsou v [1]. Kompletní kompaktní speckle TV interferometry se komerčně běžně prodávají.

5.2.2 ESPI v 3D diagnostice uměleckých předmětů

Nyní krátce pojednáme o použití ESPI holografické interferometrie (někdy také TV holografie) v diagnostice uměleckých děl. První aparatury, schopné provádět ESPI měření v terénu, jsou popsány v [23]. Dnešní ESPI systémy jsou schopny dlouhodobě monitorovat deformační degenerační procesy stárnutí památky přímo na místě.

Systematické studie použitelnosti ESPI v diagnostice uměleckých děl začaly v roce 1992 [1]. Cílem bylo spolehlivě identifikovat přítomnost defektů díla, tj. nesoudržností vrstev, odloupenutí, dutin, prasklin apod., u starých nástěnných maleb. Nejprve byla každá navržená metoda ověřována na testovacích objektech — pískovcových vzorcích s uměle vytvořenými vadami, a

teprve potom na reálných freskách. Výzkumy byly prováděny užitím teplotního napětí, to se vytvářeno infračerveným tepelným zdrojem (např. infračervenou lampou), nebo užitím proudění mírně ohřátého vzduchu. Měření byla prováděna v průběhu ochlazování zkoumaného díla. V případě, kdy se prováděla analýza defektů testovacího předmětu se simulovanými prasklinami, tak při normálové deformaci byly ve vytvořeném speckle interferogramu proužky zřetelně anomální, tj. byla narušena jejich plynulost, byly lomené, přerušené apod. V případě skutečné fresky pak narušené interferenční proužky signalizovaly přítomnost z povrchu neviditelné podpovrchové vady - praskliny.

Další experimenty byly prováděny s cílem určit, zda provedené opravy díla byly či nebyly účinné. Musíme si totiž uvědomit, že žádná oprava neodstraní všechny vady díla. Konkrétní restaurační procedura může za jistých okolností přinést částečné zlepšení stavu, takže pro dosažení co nejlepšího výsledku je velmi žádoucí a užitečné kontrolovat průběh restauračního procesu v reálném čase. A to všechny popisované holografické interferometrické metody umožňují.

Samozřejmě postupně byly možnosti ESPI testovány na všech typech uměleckých děl, tj. malbách na dřevěném podkladě, na sochách i freskách. Obecně můžeme shrnout a zdůraznit:

- Pro odhalování vad uměleckého díla se používá teplotní napětí (termální stres).
- Úvodní předběžné studie jsou prováděny na připravených testovacích modelech, které obsahují simulované nejčastěji se vyskytující vady.
- Vady se projevují nepravidelnostmi v prouzcích — nespojitosti proužků odpovídají přítomnosti prasklin, anomálie v hustotě a tvaru proužků indikují přítomnost odloupenutí či odchlípnutí ve struktuře (pro odchlípnutí jsou typické uzavřené proužky).

Hlavní omezení metody ESPI ve srovnání s klasickým holografickým ne-destruktivním testováním spočívá v podmínce, že jednotlivé speckles (tj. jednotlivé tečky koherentního osvětlení předmětu) musí být rozlišitelné použitou TV kamerou. Přitom víme, že digitální TV kamery pracují s výrazně nižším rozlišením (při záznamu videa) než digitální fotoaparáty (při záznamu statické fotografie). Skutečně největší omezení ESPI spočívá v předpokladu, na němž je založena celá ESPI teorie: posunutí a deformace významně nemění náhodné fáze a amplitudy speckle obrazce. Tento předpoklad je splněn, jestliže všechna posunutí jsou menší než je maximální hodnota daná optickým uspořádáním (viz [1]).

Navzdory omezením popsaným v předchozím odstavci docházíme k závěru, že metodou ESPI dosažené výsledky demonstrují použitelnost metody

v diagnostice uměleckých děl. Ve prospěch ESPI hovoří skutečnost, že kompaktní ESPI aparatury jsou vhodné do polních podmínek (hlavní výhoda oproti klasické holografické interferometrii).

Kapitola 6

Stereoskopické metody vzniku, záznamu a sledování 3D obrazu

6.1 Binokulární vidění – základ prostorového vnímání

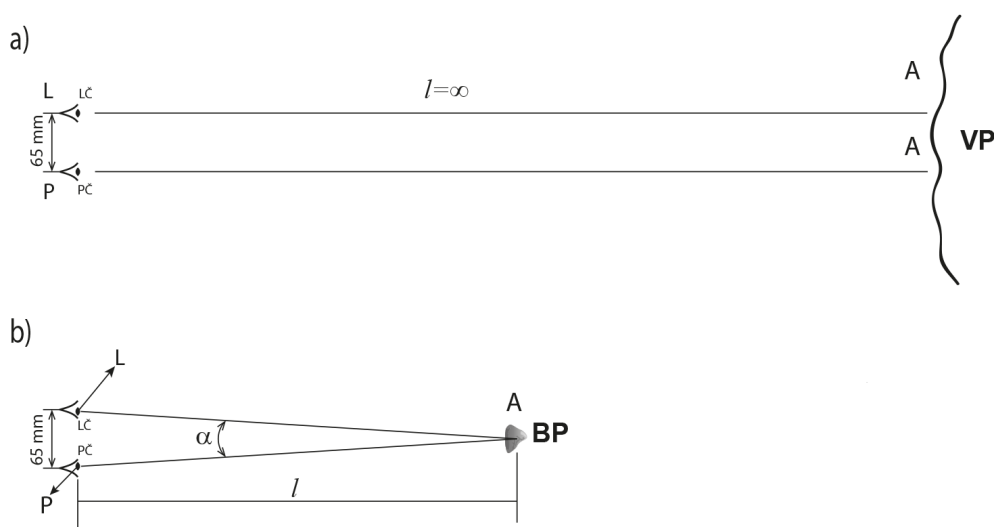
Člověk, podobně jako řada dalších živočichů, je vybaven řadou párových orgánů. K nejdůležitějším z nich patří zrak, který je u člověka také smyslovým orgánem, který mu přináší (zprostředkovává) nejvíce informací o vnějším světě.

Při pozorování velmi vzdálených předmětů – předmětů v nekonečnu – jsou přímky, spojující vždy střed pupily oka a pozorovaný předmět, pro obě oči rovnoběžné, to vyplývá ze základů geometrie a je to samozřejmou skutečností. Úhel obou přímků je tedy roven nule – viz obr. 6.1a.

Při pozorování předmětů v konečné vzdálenosti od očí je situace jiná. Pro jednoduchost si vyberme konkrétní bod pozorovaného předmětu a zaostřeme na něj obě oči – pak situace vypadá tak, jak je znázorněno na obr. 6.1b. Mezi přímkami, spojujícími vždy středy pupil obou očí a pozorovaný bod, je nenulový úhel, který je tím větší, čím je předmět očím blíže. Předpokládejme – jak je v reálu obvyklé – že předmět má nenulové rozměry. Potom, vzhledem k tomu, že mezi oběma očima je vzdálenost asi 65 mm a oči se tedy na předmět nedívají z téhož místa, ale ze dvou různých míst, dochází k tomu, že každé oko vidí předmět (scénu) poněkud odlišně. Situaci ilustruje obr. 6.1b, na němž jsou pohledy na tutéž scénu levým a pravým okem. Vidíme, že oba obrazy se liší, je to dáno rozdílnou polohou obou očí. V reálu tedy mozek člověka dostává vjemy z obou očí, což jsou dva poněkud rozdílné obrazy, současně a jak víme, zpracuje je v jeden výsledný obraz. Výsledný obraz, tj. naše vidění v reálu, nás informuje nejen o intenzitních poměrech a barvách scény

(směrem vpravo-vlevo a odzdoła-nahoru), ale také o tom, co je k nám blíže a co dále, výsledný vjem nám tedy přináší také informaci o hloubce prostoru, tj. hloubkové či vzdálenostní informace. Vnímáme tedy obraz scény ve směru vodorovném (např. osa x), svislém (např. osa y) a směrem do dálky (např. osa z). V reálu je tedy zdravý člověk schopen vnímat trojrozměrný (3D) obraz okolního světa. To, že vnímáme i hloubku prostoru, je právě dáno tím, že obrazy L (obraz vytvořený levým okem) a P (obraz vytvořený pravým okem) jsou rozdílné. V situaci, kdy L a P obrazy budou totožné (např. předmět v nekonečnu), hloubku nevnímáme a nejsme schopni ji určit. Situace je stejná, jako kdybychom scénu pozorovali jen jedním okem (a druhé zavřeli či překryli páskou apod.). Samozřejmě to znamená, že lidé, kteří mají funkční jen jedno oko, nikdy nemohou vnímat námi popisovanou hloubku obrazu (tj. třetí rozměr scény), vždy vidí jen 2D a nikoli 3D obraz, a to i pro blízké předměty. Existuje i skupina lidí, kteří trpí zdravotní vadou zvanou stereoblindness (slepota ve 3D vnímání), která jim znemožňuje vnímat hloubku prostoru, více např. zde [32].

K věci je nutno podotknout, že dle psychologů se na vnímání hloubky prostoru podílí více faktorů, i když ten výše popsáný je zásadní. Sledujeme-li



Obrázek 6.1: Binokulární vidění při pozorování předmětu: a) v nekonečnu, prakticky ve velké vzdálenosti od očí. Za takové situace jsou přímky, spojující střed pupily oka a pozorovaný předmět, pro levé i pravé oko rovnoběžné. b) při pozorování blízkých předmětů a zaostření obou očí na tentýž bod A předmětu. Za takové situace svírají úsečky LA , PA nenulový úhel α , střed pupily levého (pravého) oka jsme označili písmenem L (P).

např. běžné fotografie, malby či 2D televizi, většinou nepochybujeme, co je v obraze blíže a co dále – např. proto, že když osoba stojící před stolem jeho část překrývá, automaticky a bezděčně usoudíme, že stůl je v prostoru až za naší osobou. Je tomu tak především proto, že máme zkušenost s vnímáním 3D obrazu z reálného světa.

6.2 Optické principy stereoskopie

Nejprve definice pojmu stereoskopie: Stereoskopie je technologie, která umožňuje (vytvořit) prostorový zrakový vjem z (vyvolaný) dvourozměrné(ou) předlohy(ou) např. pomocí stereoskopických brýlí.

Korektní stereoskopické 3D zobrazovací techniky nám umožňují věrně trvale zaznamenat zrakový vjem tak, který jsme jej v reálu vnímali (resp. náš mozek získával) při pozorování původní scény, tj. kupříkladu původního uměleckého předmětu, původní osoby, krajiny, prostě při pozorování původního a obecně trojrozměrného originálu.

Na tomto místě se silně vnucuje myšlenka srovnat vjemy, které nám poskytne holografie a 3D stereoskopie — pro stručnost jen konstatování, že holografie je podstatně pokročilejší a náročnější metodou 3D zobrazení než 3D stereoskopie, a tak také - obrazně řečeno - za více peněz více muziky. Ano, znamená to, že holografie v budoucnu poskytne mnohem více než dnešní 3D stereoskopie. Stereoskopie rekonstruuje právě a jedině ten pohled na svět, který měl např. 3D fotoaparát v okamžiku pořízení fotografie. Holografie rekonstruuje původní předmětovou vlnu, takže při sledování holografického obrazu můžeme předmět obzírati z různých stran téměř tak, jak se nám zlíbí. Přes výše uvedené srovnání s holografií, je samozřejmě dnešní 3D stereoskopie korektní metodou zobrazení 3D prostoru, čímž výrazně překonává dosud obvyklá a zcela převažující plochá 2D zobrazení. Doba holografických kin, televizorů, fotoaparátů a podobných zařízení teprve přijde.

Nyní k vlastním optickým principům vzniku 3D stereoskopického obrazu. Jak víme, základem je binokulární vidění, při němž se obrazy vytvořené levým a pravým okem liší. Situaci budeme ilustrovat na skupince figurek, které jsme naskládali na stůl. Potom jsme celou skupinu figurek dvakrát vyfotografovali - první fotografii jsme pořídili z místa, ze kterého se na scénu dívalo levé oko pozorovatele (fotografa) - viz obrázek 6.2, druhou pak z místa, z něhož se na scénu dívalo pravé oko pozorovatele (fotografa) - viz obrázek 6.3.

Vlastní fotografování proběhlo takto:

- Ve skupině figurek jsme si vybrali bod, na který jsme u obou fotografií zaostřili.



Obrázek 6.2: Fotografie figurek tak, jak ji vidí levé oko.

- Fotoaparát jsme umístili na stativ tak, že osa objektivu směřovala na bod vybraný pro zaostření, a scénu sejmuli z pozice levého oka (obr. 6.2).
- Fotoaparát jsme posunuli vpravo o 65 mm (vzdálenost očí fotografa), osa objektivu opět směřovala na bod vybraný pro zaostření a pořídili jsme snímek z pozice pravého oka (obr. 6.3).

K fotografování jsme použili v rámci našeho projektu pořízený fotoaparát Sony Alfa 6000 (ILCE-6000Y). Dostali jsme tedy dva 2D obrázky naší scény, na nichž je jasně patrné, že každé oko vidí naše figurky poněkud jinak. Při reálném pozorování figurek na stole vnímáme i hloubku obrazu, na našich 2D obrázcích není zatím patrná. Abychom naši ilustraci dotáhli do konce a vytvořili z našich 2D fotografií 3D obraz scény (tj. doplnili hloubku scény), musíme zajistit jednu zcela zásadní a přitom prostou věc — při pozorování našich dvou fotografií oběma očima musí levé oko vidět jen ten obraz, který vidělo původně při fotografování (tj. obraz 6.2) a pravé oko opět jen svůj původní obraz 6.3. Nejjednodušší možností, jak výše uvedené zajistit, je použít jednu z nejstarších metod tvorby 3D obrazu, tj. metodu anaglyfického zobrazování. Tato metoda používá jednoduché 3D brýle - levé sklo brýlí je např. červené, pravé např. cyan (takže si takové brýle může vyrobit každý sám



Obrázek 6.3: Fotografie figurek tak, jak ji vidí pravé oko.

doma). Barvě cyan v RGB systému odpovídá poměr G:B rovný 1:1. Na obrázku 6.4 je výsledný 3D anaglyfický obraz naší scény, vytvořili jsme jej v souladu s výše popsaným principem metody ve Photoshopu (pořízeném v rámci projektu) těmito kroky:

- Obrázek pro levé oko jsme ponechali jen v úrovních červené barvy a umístili jej do vrstvy 1.
- Obrázek určený pro pravé oko jsme ponechali jen v úrovních cyan barvy, umístili jej do vrstvy 2 nad obrázek pro levé oko a jeho propustnost nastavili na 50% (tj. 50% G a 50% B) proto, aby pod ním byl současně vidět obraz pro levé oko.

6.3 Stručná historie stereoskopie

Stereoskopie je stará jako lidstvo samo. Jistě již i naše předky při kreslení obrázků zvířat na stěny v jeskyních napadlo, že proti realitě přece jen obrázkům něco chybí. Postupem času se umělci snažili vypořádat s rozdíly mezi trojrozměrným viděním skutečného světa a jeho dvojrozměrným ztvárněním na zdi či plátnu, desce nebo papíru. Prvním stupněm k tomu byla schopnost



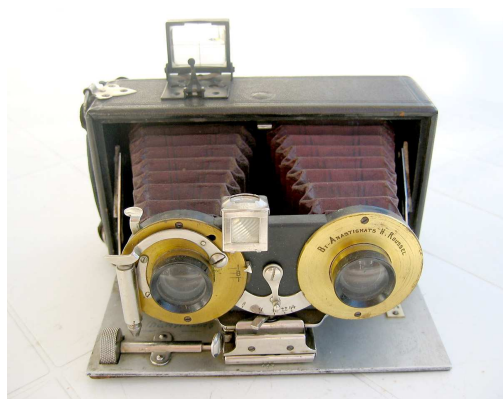
Obrázek 6.4: Výsledný anaglyfický obraz našich figurek. Pokud si nasadíte anaglyfické brýle s červeným levým a cyan pravým sklem, uvidíte 3D prostoro-
vový obraz naší scény jak na obrazovce běžného 2D monitoru, tak pokud si
obrázek vytisknete na barevné tiskárně.

znázornění perspektivy. Realitě se obrazy začaly přibližovat ve starém Řecku, kde malíři začali - spíše intuitivně - používat lineární perspektivu. V období křesťanství vývoj užívání perspektivy ustal – jsou zobrazovány hlavně výjevy ze života svatých, kteří jsou zobrazováni plasticky pomocí světla a stínu na jednolitěm pozadí. Renesance nám se svým návratem k antickým tradicím zachovala díla géniů jako byli Leonardo da Vinci, Rafaelo Santi a další. První z nich byl inovátorem v oblasti perspektivního zobrazování, zabýval se jím nejen z hlediska geometrického, ale také z pohledu optiky a atmosférické fyziky. V této době bylo zřejmě dosaženo vrcholu v perspektivním ztvárnění reality. V baroku, klasicismu, romantismu a zejména v umění 20. století začínají malíři dělat vše pro to, aby obraz byl jejich osobní výpovědí, tudíž si mohou dovolit vidět svět „pokřiveně“ — viz obrazy Piccasovy, Salvatora Dalího, obrazy kubistů a expresionistů. Již z tohoto krátkého nahlédnutí do dějin malířství vidíme, že aspekty trojrozměrného zachycení skutečnosti se mnozí umělci i vědci zabývali po staletí.

Těm zájemcům, kteří by měli zájem podívat na práce grafků a malířů 3D

stereoskopickým pohledem, doporučujeme skvělou publikaci *The 3D artbook* Tristana Eatona, přesná citace je zde [31].

Za průkopníka v oblasti stereoskopie můžeme považovat všem fyzikům známého učence Charlese Wheatstonea. Sir Charles Wheatstone se narodil 6. února 1802 se v Gloucesteru, stal se slavným britským fyzikem a průkopníkem zejména v elektřině. Méně známé již je, že se věnoval také optice a tak v r. 1838 popsal stereoskopii a v r. 1840 obdržel medaili britské Královské společnosti za své vysvětlení binokulárního vidění - vědecké publikace *Physiology of vision* (1852) nebo *The binocular microscope* (1853). Ukázal, že 3D vjem získáme v mysli kombinací 2 oddělených obrázků objektu, který snímají obě naše oči z různých úhlů (tak tomu je pouze do určité mezní vzdálenosti předmětu od očí, této vzdálenosti říkáme hloubka 3D vjemu). Sir Wheatstone zkonstruoval také řadu optických přístrojů, např. Kaleidophon (1827) či Stereoskop (1839), fotografie lze nalézt např. zde [28, Wikipedia]. Stereoskop je přístroj na prohlížení fotografií pořízených např. stereofotoaparátem. Stereofotoaparát je speciální fotoaparát, který má dva stejné objektivy, synchronizovanou závěrku, clonu i ostření. Za dobrou ilustraci stereofotoaparátu pokládáme ten, který je na obr.6.5a, fotografii jsme převzali z [29].



(a)



(b)

Obrázek 6.5: Dva stereofotoaparáty, reprezentující historii stereofotografie. Oba samozřejmě na klasické analogové záznamové médium. (a) Stereofotoaparát se dvěma měchy Le Reve, Francie, 1904 (b) Fotoaparát Stereo-mikroma II z Meopty Přerov, ČSSR (nyní ČR), rok výroby 1965.

V průběhu let se konstrukce stereofotoaparátů stále vylepšovala, firmy nabízely fandům 3D fotografií řadu příslušenství a prohlížeček, konkrétní typy lze snadno najít na internetu. Na tomto místě se pozastavíme již jen u jedné historické etapy 3D stereoskopie, která byla v 60. letech velmi populární a všem dostupná i u nás v tehdejší ČSSR. Máme na mysli techniku, využívající

stereokotoučky, obsahující obrazy pro levé a pravé oko. Ke stereokotoučkům se v podstatě v každé drogerii (tam se tenkrát běžně prodávala fotografická technika - fotoaparáty, filmy, fotopapíry, vývojky, ustalovače, to vše patří k analogové fotografii, digitální ještě neexistovala) dala koupit příslušná čtečka. Meopta Přerov - tehdejší velký výrobce širokého optického sortimentu - vyráběla fotoaparát, který se jmenoval Stereo-mikroma a který pořizoval 3D stereoskopické snímky na 16 mm film. Nejvýhodnější bylo fotografovat na pozitivní film a pořízené snímky nastříhat, naplnit jimi stereokotouček a v prohlížeče jste si proti světlu mohli prohlížet svou dovolenou na 3D fotografiích. Pro zájemce ještě ilustrace - fotoaparát Stereo-mikroma je na obr. 6.5b, který jsme převzali z nádherné webové stránky, věnované 3D stereoskopii v její historii až téměř po současnost, odkaz je zde [30].

6.4 Základní stereoskopické metody

V průběhu let byla vyvinuta řada stereoskopických metod, my se budeme věnovat těm stěžejním a nejvíce používaným. Všechny stereoskopické metody mají a musí mít společné tyto rysy: musí zaznamenat obraz pro levé oko, tak, jak jej pozorovatel viděl v okamžiku expozice musí zaznamenat obraz pro pravé oko, a to tak, jak jej pozorovatel viděl v okamžiku expozice. Tyto záznamy pro levé a pravé oko můžeme pořídit dvěma různými kamerami, jejichž středy objektivů jsou ve vzdálenosti lidských očí, nebo jedinou 3D kamerou se dvěma objektivy, jejíž dvojice objektivů je (po přepočtu na celou optiku kamery) opět ve vzdálenosti očí člověka. (Úmyslně na tomto místě neodbočujeme k různým experimentům se vzdáleností kamer, jelikož tak mohou vzniknout jen 3D vjemy, který neodpovídá tomu, jak svět ve skutečnosti vidíme. Jistě - je zde prostor pro vojenství, dokumentaci a třeba i umění). Pokud tyto dva L a P obrazy máme, můžeme 3D vjem původní scény znovu vytvořit (přiléhavý je i výraz zrekonstruovat) mnoha různými způsoby a metodami. Pro jistotu znovu připomínáme, že ať je metoda jakákoli, obraz L musíme doručit jen levému oku diváka a obraz P jen pravému oku diváka. Oko tedy nesmí vidět ten obraz, který mu není určen. Zatím jsme se v podkapitole 6.2 seznámili s jednou z nejjednodušších, nejdostupnějších a tedy i nejpoužívanějších metod - metodou anaglyf. Tato metoda umožňuje zajistit 3D vjem z 2D tisků i 2D zobrazení na 2D monitoru, 2D televizoru i projekci na obyčejném plátně či bílé stěně. Je vhodná jak pro statické fotografie, tak pro pohyblivé obrázky, tj. video a film.

Nyní již k vlastnímu přehledu 3D stereoskopických metod. Z výše uvedeného vyplývá, že pro třídění metod nebude zásadní to, jak pořizují obrazy L a P , ale jak pořízené obrazy dále zpracovávají, jak s nimi dál nakládají. Kla-

sifikovat budeme stereoskopické 3D metody pro přehrávání videa — vždyť přece např. klasický film je oněch 24 statických obr/s, čímž máme vyřešeny i statické obrázky.

V praxi tedy rozlišujeme tyto 3D stereoskopické metody:

- 3D anaglyf
- Pasivní 3D
- Aktivní 3D
- 3D polarizační modulátor (tato metoda je skloubením toho nejlepšího z pasivní i aktivní technologie, proto ji nebudeme samostatně dále rozebírat a zájemce odkazujeme na [35])
- Bezbrýlové auto-stereoskopické metody.

Anaglyfickou stereoskopii jsme již v potřebné míře popsali, takže jen doplníme, že volba barev skel (či spíše barevných umělohmotných fólií) pro levé a pravé oko má více variant, než jen námi dosud uváděnou kombinaci red-cyan, často se používají ještě tyto kombinace: červená-modrá, červená-zelená, žlutá-modrá. A konečně ještě jedna podstatná informace — přes výše uvedené výhody a jednoduchost se dnes při vzájemném srovnání existujících stereoskopických metod anaglyf pokládá za nejméně kvalitní metodu 3D stereoskopického zobrazení.

6.4.1 Pasivní technologie

Do skupiny těchto metod řadíme metody, které pro vytvoření 3D obrazu používají 3D brýle, které nepotřebují napájení z elektrického zdroje napětí. Obraz pro levé a pravé oko se totiž vytváří využitím polarizace světla, takže celá metoda se dá popsat takto:

- Na jedné projekční ploše (na speciálním 3D promítacím plátně, obrazovce 3D televizoru - všimněte si, že na rozdíl od anaglyfu už to nemůže být obyčejné plátno či bílá stěna nebo 2D televizor) vytvoříme současně obraz L pro levé oko i obraz P pro pravé oko. V každém časovém okamžiku jsou tedy na projekční ploše vždy obrazy pro obě oči.
- Protože na projekční ploše jsou v každém okamžiku vždy obrazy L a P pro obě oči současně (u videa jsou tedy vždy oba v jediném framu) a náš obraz na projekční ploše má celkové rozlišení Res , má to dva hlavní důsledky, popsané níže.
- Divák, který obraz pozoruje, musí levým okem vidět jen obraz L a pravým okem jen obraz P . To pasivní technologie zajišťuje užitím rozdílné polarizace obou obrazů např. tak, že obraz L je na projekční ploše

zobrazen se svislou lineární polarizací a obraz P s vodorovnou lineární polarizací. Takové zobrazení musí zajistit projektoři, kterými obraz promítáme, nebo na své obrazovce (pasivní) 3D televizor. Protože - jak víme ze základů optiky - samotné lidské oko neumí vůbec rozlišit, jak je světlo polarizované (a víme, že dokonce neumí ani rozlišit, zda je či není polarizované), musí divák použít prostředek, pomocí kterého oba obrazy rozliší, tímto prostředkem jsou 3D brýle s polarizačními filtry (skleněnými nebo umělohmotnými), které do levého (pravého) oka propustí obraz L (P), protože polarizační filtr brýlí před levým (pravým) okem propouští pouze světlo té polarizace, ve které je obraz pro levé (pravé) oko.

Připomínáme, že pro svisle (vodorovně) lineárně polarizované světlo vektor \vec{E} intenzity elektromagnetického pole kmitá pouze ve svislé (vodorovné) rovině, kdežto u přirozeného světla (např. ze Slunce, ohně) kmitá \vec{E} ve všech rovinách (ve všech směrech kolmých na směr šíření světla).

- Druhým výše avizovaným důsledkem je, že obrazy L a P se musí podělit o celkové rozlišení Res , se kterým obraz promítáme nebo se kterým se zobrazuje na obrazovce pasivního 3D TV, což tedy znamená, že z celého framu mají oba obrazy pouze poloviční rozlišení. Znamená to, že pokud bude náš pasivní 3D TV mít ve 2D režimu např. Full HD rozlišení $Res = 1920 \times 1080$ pixelů, budou mít ve 3D režimu obrazy L (P) putující do oka diváka pouze rozlišení $Res/2$, tj. např. 960×1080 pixelů. V právě uvedeném případě toho, jak se obrazy L a P podělí o celkové rozlišení zobrazovací plochy, jsme zvolili stav odpovídající variantě side-by side pasivní 3D stereoskopie - další varianty viz níže.

Divák tedy ve 2D režimu uvidí obraz s dvakrát vyšším (tedy lepším) rozlišením než ve 3D režimu (zdůrazňujeme, že se týká právě jen pasivní 3D technologie), jinými slovy u pasivní 3D technologie po přepnutí z 2D režimu do 3D režimu klesne rozlišení obrazu na polovinu. Tato skutečnost je hlavní nevýhodou celé pasivní 3D technologie. Naopak výhodou pasivní technologie jsou levné (řádově 100 Kč), lehké a jednoduché 3D brýle (s polarizačními filtry) bez napájecí baterie. Prodejci 3D pasivní technologii prezentují jako neblíkáající a pro diváka zdravotně nezávadnou.

- Používají se tyto varianty pasivní 3D stereoskopie: half side-by side (obrazy L a P jsou zobrazeny tak, že využívají polovinu dostupného horizontálního rozlišení), top/bottom (obrazy L a P jsou zobrazeny tak, že využívají polovinu dostupného vertikálního rozlišení), line alternate (pro řádkově prokládané 3D monitory - obrazy L a P jsou zobrazeny

prokládaně tak, že obrazu L patří např. všechny liché řádky a obrazu P všechny sudé řádky), checkerboard (např. pro DLP 3D monitory - obrazy L a P využívají polovinu dostupného horizontálního i vertikálního rozlišení).

Ilustraci pasivní 3D stereoskopie jsme se rozhodli provést obrázkem převzatým z [www stránky \[33\]](#), na které je i pěkné ilustrační video.

6.4.2 Aktivní technologie

Budiž uvedeno hned v úvodu této části — aktivní 3D technologie poskytuje nejlepší 3D obraz ze všech v současnosti používaných stereoskopických metod. Aktivní technologie používá k vytvoření 3D obrazu 3D brýle, které potřebují elektrické napájení, zpravidla z vlastní baterie. Kromě toho činnost aktivních 3D brýlí musí být synchronizována se zobrazovacím 3D zařízením. Protože 3D brýle u této technologie samy o sobě nepracují a vyžadují aktivní napájení, je celá technologie nazývána aktivní 3D stereoskopie.

Aktivní stereoskopie se používá především u 3D projektorů a 3D televizorů, o něco méně již u 3D monitorů. Princip celé technologie asi nejlépe ilustruje video, na které se můžete podívat [zde \[34\]](#).

V principu 3D aktivní technologie pracuje takto:

- Při 3D projekci, kdy stačí jediný projektor, se obraz promítá na obyčejné projekční plátno (nebo také např. bílou zeď) s dvojnásobnou frekvencí $2f$ oproti frekvenci f , se kterou je promítané video zaznamenáno. Dvojnásobnou frekvencí proto, že se neustále pravidelně střídají obrazy L a P pro levé a pravé oko. Protože obrazy L a P se na plátně střídají, mají své původní rozlišení.
- Aktivní 3D televizor na své obrazovce také střídavě zobrazuje obrazy L a P pro levé a pravé oko v plném původním rozlišení, takže snímková frekvence je opět dvojnásobná ($2f$) oproti frekvenci f , se kterou je zaznamenáno promítané 3D video.
- V daném časovém okamžiku je tedy na plátně (obrazovce) buď obraz L pro levé oko nebo obraz P pro pravé oko. Opět - jako v celé 3D stereoskopii - platí, že každé oko musí vidět jen svůj obraz a nesmí vidět obraz určený pro druhé oko. Aby obraz L (P) vidělo jen levé (pravé) oko, nastupují opět 3D brýle, které tentokrát pracují tak, že v době, kdy je obrazovce např. obraz L , je sklo pro levé oko průhledné a sklo pro pravé oko zcela neprůhledné, tj. zatemnělé - černé. Skla v brýlích jsou v reálu tvořeny LCD panely, které střídavě zatemňují (zneprůhledňují)

průhledy pro pravé a levé oko. Je samozřejmé, že zatemňování aktivních 3D brýlí musí přesně odpovídat tomu, jak se střídají obrazy L a P , tj. synchronně v čase. Synchronizace mezi obrazem na plátně (obrazovce) se zajišťuje tak, že zdroj obrazu (projektor, TV) vysílá synchronizační impulsy, kterými se brýle při zatemňování řídí. Synchronizační impulsy se nejčastěji vysílají v infračerveném světle (IR impulsy), brýle je přijímají a synchronizují jimi svou činnost. Brýle tedy obsahují IR přijímač, mikroelektroniku a ke své činnosti potřebují elektrický zdroj, zpravidla malou knoflíčkovou baterii. Aktivní 3D brýle většinou poznáme na první pohled podle velikosti.

Výhody 3D technologie jsou zřejmé — při přepnutí zařízení z 2D do 3D módu neklesá rozlišení promítaného 3D obrazu a celkově je ze všech stereoskopických technologií obraz nejkvalitnější. Nevýhodou jsou o něco větší a také dražší 3D aktivní brýle (asi 1000 Kč/kus), proto se např. nepoužívá ve velkých kinech.

Na tomto místě pokládáme za vhodné uvést tuto poznámku, která je de facto důsledkem plynoucím ze základních charakteristik způsobu přehrávání pasivního a aktivního 3D stereoskopického videa. Samotný stereoskopický 3D záznam musí být proveden tak, že svému přehrávači v závislosti na použitém zobrazovači umožní např. přehrání half-side by side (pak má obraz pro každé oko ve vodorovném směru poloviční rozlišení a přehrává se s frekvencí f), tak např. přehrání v aktivním režimu (pak má obraz pro každé oko plné rozlišení a přehrává se s frekvencí $2f$).

6.4.3 Bezbrýlové technologie

Ideální případ - 3D obraz můžeme sledovat bez omezujících 3D brýlí. Až bezbrýlové technologie vospějí, tak potom pravděpodobně přijde renesance 3D stereoskopie (tj. sledování téměř všeho ve 3D) a bude pokračovat bouřlivý rozvoj, jehož jsme byli svědky v roce 2011 — to byl rok mohutného nástupu 3D televizorů, 3D blue-ray přehrávačů, projektorů atd. Právě nutnost používat brýle pro kvalitní 3D obraz pokládáme za příčinu současného poklesu zájmu o 3D techniku.

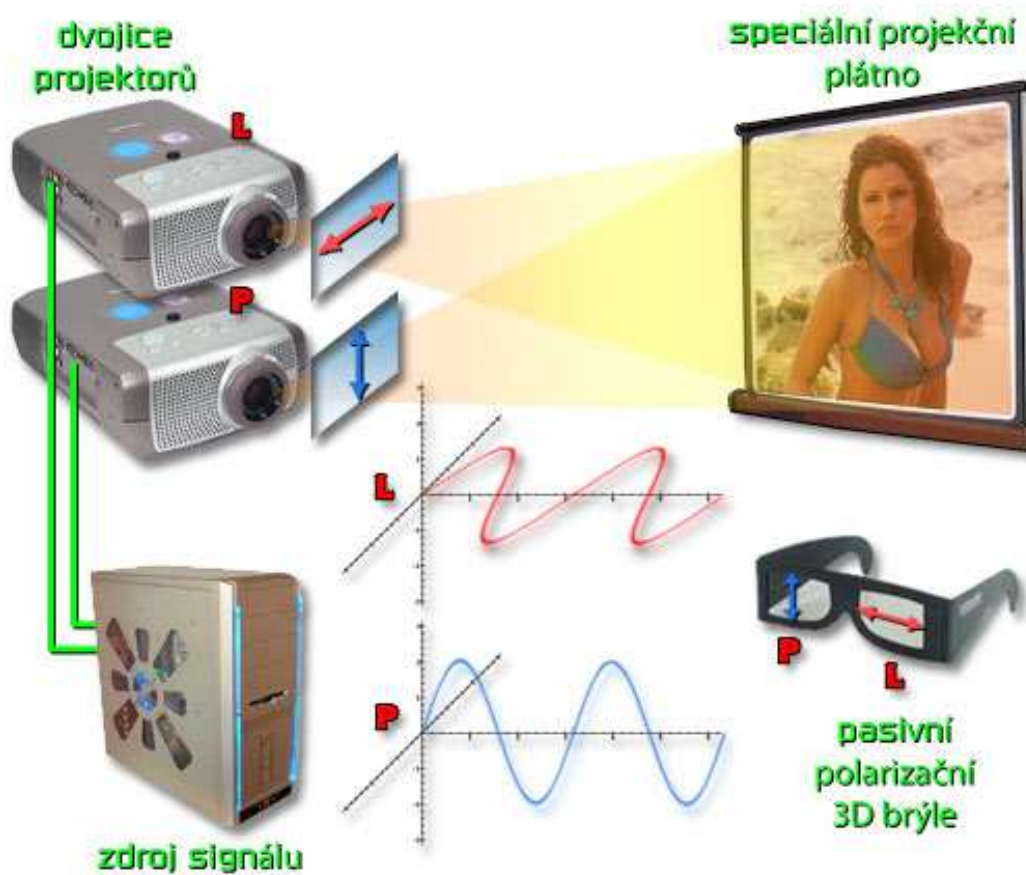
Současný stav bezbrýlové technologie lze charakterizovat takto:

- Současné auto-stereoskopické monitory (či celé systémy) nedokáží poskytnout 3D obraz, který by diváka mohl uspokojit.
- Podle některých zdrojů mnohé světové firmy pozastavily financování vývoje bezbrýlových 3D stereoskopických systémů.

- Jiné zdroje předpokládají, že kvalitní 3D stereoskopické systémy bez brýlí budou založeny na jiných principech než současné autostereoskopické monitory.
- Současné malé 3D stereoskopické monitory, jak je známe především z displejů 3D kamer či fotoaparátů, poskytují podle našeho názoru slušný 3D obraz, i když jen v určitém rozmezí úhlů a vzdáleností pozorování. Proto předpokládáme, že vývoj bezbrýlových auto-stereoskopických monitorů (resp. celých komplexních bezbrýlových 3D systémů) skončí úspěšně, je jen otázkou času, kdy to bude.

SCHÉMA PASIVNÍ STEREOSKOPICKÉ 3D PROJEKCE

(WWW.GALI-3D.COM)



Obrázek 6.6: Pasivní stereoskopie užitím dvou synchronizovaných projektorů, polarizačního plátna a polarizačních brýlí. Polarizační 3D plátno má povrch upraven tak, že obrazy L a P polarizuje tak, jak je znázorněno na obrázku (obrázek převzat z [www \[33\]](http://www.gali-3d.com)).

Kapitola 7

Spektroskopie při dokumentaci uměleckých děl v praxi

V rámci tvůrčí pracovní cesty do Itálie byly užitím 3D techniky vytvořeny dokumenty, jejichž cílem je ukázat, jak může být 3D stereoskopická technika prospěšná pro archivaci současného stavu nejvýznamnějších kulturních památek. Vytvořené 3D multimediální pořady dokumentují starobylé městečko Paestum a světoznámé městečko pod Vesuvem - Pompei.

7.1 Použitá stereoskopická technika a software

Nyní popíšeme stereoskopickou techniku, kterou jsme měli k dispozici. Jde o 3D vybavení, zakoupené převážně v rámci projektu, jehož se týká také tento studijní text.

K dispozici jsme měli tyto 3D kamery - starší JVC GY-MZ1 (z r. 2011) a modernější Panasonic Z10000 (z roku 2013).

Pro sledování 3D pořadů máme k dispozici následující 3D zobrazovače: 3D TV LG 102 cm z r. 2011 (pasivní technologie tvorby obrazu), projektor Epson z r. 2014 (aktivní technologie tvorby obrazu) a monitor LG 23MD (pasivní technologie) z r. 2014.

Pro zpracování pořízeného 3D stereoskopického materiálu jsme se rozhodli mezi všemi klasickými stříhovými programy. Snad nejbližší jsme měli k Sony Vegas, který již od verze 10e (a pouze tu máme k dispozici z projektu FRVŠ z roku 2011) by měl umět 3D video zpracovávat. Je totiž jedním z mála programů, který ve svém nastavení disponuje možností zaškrtnout, že zpracovávané video je ve 3D. V rámci projektu jsme zakoupili programový balík Adobe Master Collection verze 6, v propagačních materiálech firma Adobe prohlašuje, že program umí pracovat se 3D videem, dále také uvádí seznam

3D kamer, jejichž 3D video umí program nově načíst. Obě zde zmíněné skutečnosti nás naplňovaly optimismem, praxe se však ukázala být zcela jiná. Ukázalo se například, že i nová verze Adobe Master Collection verze 6 umí se 3D videem pracovat až po zakoupení dalších plug-in doplňků produkovaných třetími stranami apod.

Předpokládáme, že problematice vlastního zpracování (stříhu) 3D videa, která samozřejmě patří spíše do oblasti multimédií či filmové tvorby, bychom v budoucnu mohli věnovat samostatný studijní text.

7.2 3D dokument starobylé Paestum

V současnosti leží v jižní Itálii, asi 100 km na jih od Neapole, malé přímořské městečko Paestum. Na okraji tohoto městečka se za zbytky původních hradeb nachází pozůstatky původního města z počátku našeho letopočtu. Starobylé Paestum představuje nejrozsáhlejší a nejzachovalejší starořecké památkové území mimo území samotného Řecka.

Proč jsme se rozhodli dokumentovat starobylé městečko Paestum? Tento archeologický skvost je nejvýznamnější památkou řeckého stavitelského umění na italské pevnině. Nachází se v překrásné krajině Kampánie, asi 85 km jihovýchodně od Neapole. Tato oblast je slunná, úrodná, daří se zde vínu, olivám, po kraji je rozseto množství buvolích farem, kde se z buvolího mléka vyrábí lahodná mozzarella. Není divu, že se tato oblast zalíbila řeckým kolonistům a v 6. stol. př. n. l. zde založili městečko Poseidonia, která se brzy stala jedním z nejvíce prosperujících a vzkvétajících měst v celém Středozeří. Od roku 273 př. n. l. již město patřilo Římanům, ti mu dali nové jméno – Paestum. Město však v průběhu dalších dějin začalo pomalu upadat a kvůli opakované malárii a nájezdům Saracénů ho obyvatelé postupně opustili. Upadlo tak do zapomnění, ze kterého bylo probuzeno až v 18. století, ve stejnou dobu, kdy byly objeveny Pompeje a Herkulaneum.

Návštěvníka starobylého Paesta nejvíce zaujmou 3 antické chrámy. Největší je Neptunův chrám, pochází z 5. stol. př. n. l. a řadí se mezi nejzachovalejší řecké chrámy. Nejstarší je Héřin chrám, nazývaný také Basilika, archeologové datují jeho původ až do 6. stol. př. n. l. Poslední a asi nejvíce zdevastovaný je chrám bohyně Ceres. Nebyly to jen chrámy, které jsme při naší návštěvě obdivovali. Chodili jsme kamennými a částečně zarostlými ulicemi Paesta, představovali jsme si život někdejších obyvatel, narazili jsme na bazén, divadlo, tehdejší náměstí, domy velké bohatých aristokratů i domečky sociálně slabších obyvatel. Pravda, někdy naše představivost musela být obrovská, z velké části šlo o pozůstatky staveb, ruiny. Ale toto místo má zvláštní kouzlo a přitažlivost a snad naše 3D dokumenty alespoň trochu při-

blíží onu magickou krásu ostatním anebo, ještě lépe, zažehnou u některých touhu spatřit toto místo na vlastní oči.

Poblíž vchodu do starobylého Paesta se nachází Národní archeologické museum, založené v r. 1952, s přibývajícimi nálezy se budova neustále rozšiřovala, k poslednímu rozšíření došlo v r. 1999. Uvnitř jsme mohli shlédnout různé sošky, votivní a ozdobné terakotové předměty, amfory, bronzové vázy. Nejcennějším exponátem muzea je komplex malovaných náhrobních desek v tzv. „Hrobce potápěče“. Je to vzácný příklad malovaného umění z období Magna Grecia

7.3 3D dokument starobylé Pompeje

Pompeje — kdo by je neznal. V italštině Pompei - nové i staré městečko se stejným názvem leží poblíž stále aktivní sopky Vesuv (Vesuvio), která svými erupcemi tolikrát ovlivnila celé své okolí.

Město založili Etruskové v 7. stol. př. n. l., v době jejich územní rozpínivosti na jih, do oblasti Kampánie. Pompeje byly situovány na vyvýšenině na tyrhénském pobřeží u ústí řeky Sarno. Časem skončily pod hegemonií Říma a staly se typickým rezidenčním centrem, obývaným šlechtickými rody a propuštěnými otroky, kteří bohatli z obchodu i řemesel. V roce 62 našeho letopočtu postihlo Pompeje silné zemětřesení, bylo to výstražné znamení, jakási předzvěst tragédie, ke které došlo r 79. a která měla katastrofální následky. Toho roku se sopka Vesuv náhle probudila a zasypala okolí tunami popílku, proudy lávy vytékaly z kráteru a zaplavily vše, co bylo v jejich dosahu. Obyvatelé byli udušeni, někteří podlehli smrti při útěku z města. Erupce byla tak silná, že horní část sopky se propadla a vytvořil se současný, velmi široký kráter. Pompeje zůstaly po této tragédii pohřbeny pod šestimetrovou vrstvou popílku, který ale zároveň město ochránil a „zakonzervoval“ na dlouhá staletí. Díky tomu jsou Pompeje jediné starověké město, jehož topografie nebyla změněna a tudíž je vidíme tak, jak bylo postaveno původně.

Spolu s Pompejemi byla zničena také města Herculaneum, Stabie, Oplontis a Boscoreale. Nám se podařilo navštívit městečko Oplontis, kde jedinou zachovalou památkou je Villa Poppaea, údajně ji císař Nero nechal postavit pro svou manželku. Zde jsme mohli obdivovat zachovalost interiérů a nástěnných maleb. Snad naše 3D dokumenty alespoň trochu pomohou zachovat tyto historicky cenné památky budoucím generacím.

Kapitola 8

Závěr

Cílem tohoto studijního textu bylo pojednat o možnostech 3D holografických a spektroskopických metod při ochraně a zachování kulturního dědictví lidstva. Čtenář se tak postupně seznámí se základy holografie — nejmocnějšího 3D zobrazení, které umí rekonstruovat celou původní předmětovou vlnu, takže nerozlišíme, zda vidíme skutečný předmět či jeho holografický obraz — i při holografickém zobrazení můžeme předmět obhlížet z různých stran stejně jako v reálu. Deformace a změny (uměleckých) předmětů, způsobené např. jejich stárnutím a postupnou degenerací, umí detekovat a kvantifikovat holografická interferometrie, proto jsou jejím principům a variantám věnovány další části textu. Následuje část věnovaná specifickým nasazením holografické interferometrie při diagnostice stavu uměleckých děl.

Stereoskopické 3D metody poskytují také plnohodnotné prostorové zobrazení předmětů, avšak pouze z toho pohledu, z něhož byl pořízen konkrétní stereoskopický záznam. Nemůžeme tedy předmět obhlížet z různých stran. V textu jsou vysvětleny principy a vlastní základy 3D stereoskopie a také její varianty. Principy stereoskopie jsou přímo v textu prakticky ilustrovány. Hlavní roli 3D stereoskopických metod vidí autoři tohoto dokumentu v možnostech archivace současného stavu mnoha pamětihodností, kterou nám historie lidstva přinesla. Ilustrací těchto možností jsou vytvořené 3D stereoskopické dokumenty archivující dnešní pohled na dvě starobylá města v jižní Itálii - Paestum a Pompeje.

Literatura

- [1] Paoletti, D. and Spagnolo, G. S., 1996, Interferometric methods for artwork diagnostics, *Progress in Optics*, Wolf E., ed. (North-Holland, Amsterdam) **35**, 199–227
- [2] *Non-destructive Testing Handbook*, 1985 (American Society of Non-destructive Testing, Columbus, OH)
- [3] Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, (New York: John Wiley).
- [4] Jones, R. and Wykes, C., 1989, *Holographic and Speckle Interferometry, 2nd Ed.* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [5] Amadesi, S., Grella, R. and Guattari, G., 1974, *Appl. Opt.* **13**, 2009.
- [6] Gabor, D., 1949, *Proc. Roy. Soc., Ser. A* **197**, 454.
- [7] Leith, E. N. and Upatnieks, J., 1962, *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123.
- [8] Denisyuk, Y. N., 1962, *Soviet Phys.–Doklady* **7**, 543.
- [9] Schnars, U. and Jüptner, W., 1994, *Appl. Opt.* **33**, 179–181.
- [10] Schnars U., 1994, Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms, *J. Opt. Soc. Am. A* **11**(7), 2011–2015.
- [11] Pedrini, G., Tiziani, H. and Zou, Y., 1997, *Opt. Laser Eng.* **26**, 199–219.
- [12] <http://www.baslerweb.com/en/products/>
- [13] http://www.photobit.com/Products/Product_Matrix/product_matrix.htm
- [14] http://www.photobit.com/Technology/White_Papers/Using_a_Nyquist_Chart_1/using_a_nyquist_chart_1.htm

- [15] Westlake, D., Wuerker, R. F. and Asmus, J. F., 1976 *SMPTE J.* **85**, 84
- [16] Cathey, W. T., 1974, *Optical Information Processing and Holography*, (New York: John Wiley).
- [17] Smith, H. M., 1975, *Principles of holography*, (New York: John Wiley & Sons Inc.).
- [18] Born, M., Wolf, E.: *Principles of Optics*, 6th edition, Pergamon Press, Oxford 1980
- [19] Mertz, L., 1983, *Applied Optics* **22**, 1535–1539.
- [20] Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., 1991, *Fundamentals of Photonics*, (New York: John Wiley & Sons, Inc.).
- [21] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipes in C (The Art of Scientific Computing)*, 2nd edition, (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- [22] Pedrini, G., Fröning, P., Fessler, H. and Tiziani, H. J., 1998, *Applied Optics* **37**, 6262–6269.
- [23] Gülker, G., Hinsch, K., Hölscher, C., Kramer, A. and Neunaber, H., 1990, *Opt. Eng.* **29**, 816.
- [24] Sekanina, H., Pospíšil, J.: *Digital holography using a digital photo-camera*, Journal of Modern Optics Vol. 49, No.13, 2083-2092
- [25] Sekanina, H., Hledík, S.: *Digital holographic interferometry using a digital photo-camera*, Acta Physica Slovaca 51 (4), 261-270
- [26] <http://cf.olympus-europa.com/consumer/digimg/intro.cfm?id=C-3000ZOOM>
- [27] <http://www.delorie.com/djgpp/>
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope#Wheatstone_stereoscope
- [29] http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bchov%C3%BD_fotoapar%C3%A1t
- [30] http://www.stereokotoucky.cz/cz/camera_cz.html

- [31] *The 3D art book*, 2011 (Prestel Verlag, Munich-Berlin-London-New York)
- [32] http://en.wikipedia.org/wiki/Stereopsis#Coarse_and_fine_stereopsis
- [33] <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-pasivni-3d/>
- [34] <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-aktivni-3d/>
- [35] <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-3d-modulator/>