

# MATLAB GUI PRO MĚŘENÍ DEFORMACÍ DIGITÁLNÍ HOLOGRAFICKOU INTERFERENCÍ

*Pavel Psota, Vít Lédl, Jan Václavík*

Technická univerzita v Liberci, Ústav řízení systémů a spolehlivosti

## Abstrakt

**Holografická interferometrie již několik desítek let plní nenahraditelnou úlohu mezi měřicími technikami. Je to univerzální technika, kterou lze adaptovat na velmi širokou škálu různých měření od deformací těles, přes vibrace, až po teplotní nebo tlaková rozložení v plynech. Technika se neustále vyvíjí a rozšiřují se i její možné aplikace. Fáze vývoje měřicí techniky jsou od čistě fyzikálně optické metody, kdy byly hologramy zaznamenány analogově a interferogramy sejmuty na film a vyhodnoceny experimentátorem, přes počítačové vyhodnocení sejmutých hologramů, kdy technika zaznamenala první masivní nástup výpočetních strojů a algoritmů, až po dnešní stav tzv. digitální holografické interferometrie. V té je hologram zaznamenán elektronicky na CCD nebo CMOS pole a objektová vlna je rekonstruována za pomoci sofistikovaných algoritmů. Vlnová pole jsou porovnána a výsledky zobrazeny. Tento proces od začátku až dokonce je poměrně náročný a vyžaduje desítky různých matematických operací. Některé probíhají zcela automaticky a jiné vyžadují zásah operátora. Pro tyto účely byla vytvořena aplikace v prostředí Matlab GUI zastřešující všechny potřebné operace a navíc vybavená množstvím grafických prvků a nástrojů usnadňujících práci s daty. Vytvořená aplikace splňuje požadavky na ní kladené velmi dobře a výrazně usnadnila a zrychlila provádění celé metody holografické interferometrie.**

## Úvod

Holografická interferometrie (HI) je výkonný měřicí nástroj uplatnitelný v širokém spektru různých aplikací. Tato celoplošná, bezkontaktní a diferenční měřicí metoda je dnes široce využívána v mnoha oblastech výzkumu a nedestruktivního testování jako nenahraditelná bezdotyková metoda.

Za několik posledních desítek let vývoje digitální záznam dosáhl takové úrovně, že je využíván i pro tak specifický účel, jakým je digitální holografie. Digitalizace umožňuje efektivní zpracování dat a jejich rychlé vyhodnocení. Nepříjemné a časově náročné získávání dat i jejich zpracování v klasické holografii, kde jako záznamové prostředí slouží analogové fotopolymerní či stříbrohalogenidové médium, je postupně nahrazováno digitálním záznamem realizovaným formou CCD či CMOS polí. Veliké přednosti digitální holografie nespočívají pouze v získávání či ukládání dat, ale také v možnostech jejich následného upravování a zpracování numerickými operacemi a algoritmy.

Digitalizace s sebou přináší také jistá omezení daná konečným rozlišením digitálního senzoru. Klasická záznamová prostředí jako je např. stříbrohalogenidová emulze má rozlišovací schopnost přes 5000 čar/mm, kdežto senzor CCD (v závislosti na rozměrech pixelu konkrétního CCD) řádově 500 čar/mm. Z Shannonova-Nyquistova vzorkovacího kritéria pak vyvstávají omezení na velikost snímaného objektu či jeho vzdálenost od CCD. Avšak vhodným upravením měřicího uspořádání (např. přidáním optických prvků jako jsou čočky,...) lze splnit vzorkovací kritérium i pro velké či blízké objekty. Pro velkou většinu praktických aplikací je rozlišení digitálních senzorů

zdaleka postačující. Nutnost pečlivějšího a pracnějšího postupu při sestavování holografické měřicí aparatury je zcela převážena výhodami při následném zpracování dat.

Digitální HI je založena na interferenci dvou komplexních vlnových polí, která vyjadřují rozdílné stavy zkoumaného objektu. Postupně zaznamenáme na CCD dva hologramy, reprezentované rozložením intenzity zaznamenané CCD senzorem  $f$ , nesoucí informace o příslušných stavech – např. nedeformovaný a deformovaný objekt. Při záznamu hologramu (Obr. 1a) spolu interferuje referenční a objektová vlna,  $U_r$  resp.  $U_o$ , což lze vyjádřit:

$$f \propto |U_o + U_r|^2 = |U_o|^2 + |U_r|^2 + U_o U_r^* + U_o^* U_r \quad (1)$$

Rekonstrukce vlnových polí v digitální holografii i veškeré další zpracování dat již probíhá pouze numericky. Pomocí Fresnelovy teorie difrakce získáme zrekonstruovaná komplexní pole  $U_1, U_2$ , která vyjadřují informace o daných stavech. Odtud pak lze vypočítat intenzitu každého objektu v bodě  $[x, y]$ :

$$I_i(x, y) = |U_i(x, y)|^2. \quad (2)$$

Druhým důležitým parametrem světelné vlny je její fáze, kterou lze numericky získat:

$$\varphi_i(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}\{U_i(x, y)\}}{\text{Re}\{U_i(x, y)\}}. \quad (3)$$

Veškerá optická záznamová média jako jsou CCD senzory, kamery, oko, ... jsou tzv. kvadratické detektory, tj. zaznamenávají pouze intenzitu světla. Informace o fázi, která přímo vypovídá o hloubkové (3D) struktuře objektu, je během klasického záznamu ztracena a její hodnoty nelze zjistit přímo. Proto je v klasické HI proces výpočtu fáze, který je založen na zkoumání rozložení a změny intenzity interferenčního obrazce, náročný. Algoritmus vyhodnocování fáze vyžaduje časté zásahy operátora a většina hodnot fáze není spočtena přímo, nýbrž je interpolována. Naopak v digitální holografii, kde je celý proces rekonstrukce prováděn numericky, získáváme hodnoty fáze v jednotlivých obrazových bodech přímo dle (3).

Rozdíl fází daného objektu pro různé stavy (4)

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y)$$

pak již přímo odráží charakteristickou změnu mezi jednotlivými stavy. Odtud lze získat hodnoty např. deformaci, rozložení indexu lomu, rozložení teplot teplotního pole, ...

K účelu zpracovávání a vyhodnocování digitálních hologramů byla vytvořena Matlab GUI aplikace. Postup pro získání kvantitativních hodnot deformace tak, jak je prováděn v naší aplikaci, se skládá z několika kroků, jejichž stručná matematická interpretace je nastíněna v následujícím teoretickém úvodu. Experimentální část demonstruje použití a výsledky naší aplikace na konkrétním případě.

## Teoretický úvod

### Rekonstrukce vlnového pole

V klasické holografii se rekonstrukce snímaného objektu provádí osvětlením hologramu referenční vlnou. Pro výsledné pole  $U$  za rovinou hologramu s propustností  $f$  dostáváme:

$$U = U_r f \propto U_r I_o + U_r I_r + U_o I_r + U_o^* U_r^2, \quad (4)$$

kde  $I_r$  resp.  $I_o$  je intenzita referenční popř. objektové vlny. První dva výrazy vztahu (4) odpovídají procházející referenční vlně – stejnosměrná složka, další výraz  $U_o I_r$  reprezentuje reálný obraz objektu a konečně poslední výraz odpovídá konjugované objektové vlně tj. obrazu virtuálnímu.

Naopak v holografii digitální je celý proces rekonstrukce řešen numericky. Při kvantitativním popisu rekonstruované vlny vycházíme z difrakční teorie a Fresnelovy aproximace. Tu můžeme použít, pokud je velikost CCD senzoru mnohem menší než vzdálenost objektu a CCD. Pak pro rekonstruované pole  $U$  v bodě  $[n, m]$  dostáváme:

$$U(n, m) = e^{j\pi\lambda d \left( \left( \frac{n}{N\Delta\xi} \right)^2 + \left( \frac{m}{M\Delta\eta} \right)^2 \right)} \times \\ \times \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M f(k\Delta\xi, l\Delta\eta) r^*(k\Delta\xi, l\Delta\eta) e^{\frac{j\pi}{\lambda d} ((k\Delta\xi)^2 + (l\Delta\eta)^2)} e^{-j2\pi \left( \frac{kn}{N} + \frac{lm}{M} \right)},$$

kde  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\lambda$  je vlnová délka koherentního zdroje,  $d$  vzdálenost objektu od CCD,  $\Delta\xi$  resp.  $\Delta\eta$  jsou rozměry pixelu CCD,  $N \times M$  odpovídá rozlišení senzoru CCD,  $f$  pole intenzity hologramu a  $r^*$  je referenční vlna. Ta bývá buď rovinná, nebo sférická.

Rovinnou referenční vlnu dopadající pod úhly  $\theta_1, \theta_2$  v ortogonálních směrech k normále hologramu můžeme zapsat:

$$r^* = U_r e^{\frac{j\pi}{\lambda d} (k \sin\theta_1 \Delta\xi + l \sin\theta_2 \Delta\eta)},$$

sférická vlna je pak definována:

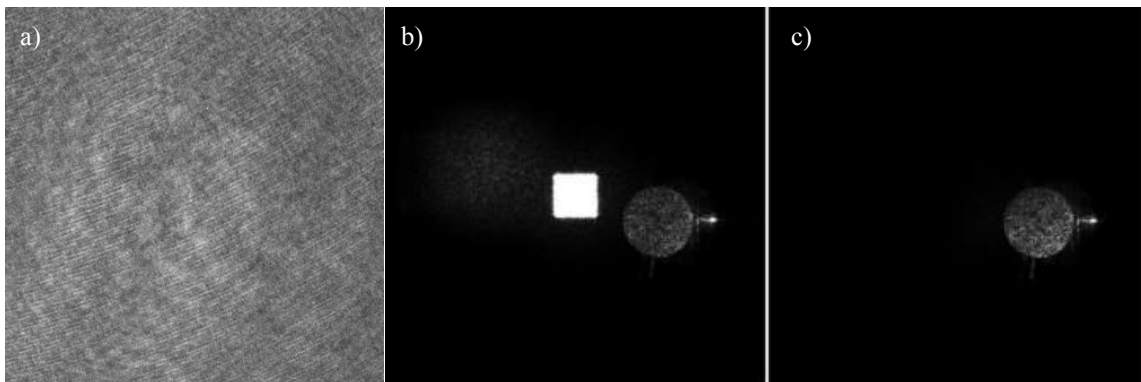
$$r^* = U_r e^{\frac{j2\pi d}{\lambda}} e^{\frac{j\pi}{\lambda d} ((k\Delta\xi)^2 + (l\Delta\eta)^2)}. \quad (7)$$

Zrekonstruované komplexní pole je složeno z tří komponent (Obr. 1b): reálného obrazu, virtuálního obrazu a stejnosměrné složky (4). Virtuální obraz obsahuje stejnou informaci o objektu jako obraz reálný, ale je rozostřen.

V některých případech je reálný obraz překryt stejnosměrnou složkou, pak je nutné ji potlačit. Stejnosměrná složka je charakteristická svými nízkými prostorovými frekvencemi, tudíž lze aplikovat na Fourierův obraz hologramu vysokofrekvenční propust. Ta může být realizována například takto [2]:

$$f_F(k, l) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ F(k, l) - \frac{1}{9} \begin{bmatrix} F(k-1, l-1) + F(k-1, l) + F(k-1, l+1) + \\ + F(k, l-1) + F(k, l) + F(k, l+1) + \\ + F(k+1, l-1) + F(k+1, l) + F(k+1, l+1) \end{bmatrix} \right\}, \quad (8)$$

kde  $f_F$  jsou hodnoty filtrované intenzity hologramu,  $F$  jsou hodnoty Fourierova obrazu hologramu původního a  $\mathfrak{F}^{-1}$  znázorňuje inverzní Fourierovu transformaci. Jinou možností filtrace hologramu je přiřadit nízkým frekvencím, nacházejícím se v kruhovém okolí středu jeho Fourierova obrazu, nulu a transformovat jej zpět do prostorové oblasti.



Obr. 1: Rekonstrukce intenzity reálného obrazu: a) Pořízený digitální hologram reprezentovaný rozložením intenzity  $f$ , b) v pravé části pole po rekonstrukci se nachází zaostřený piezoelektrický člen kruhového tvaru, v levé části pole nezaostřený virtuální obraz a světlá oblast uprostřed je stejnosměrná složka, c) stejné pole po potlačení stejnosměrné složky a virtuálního obrazu.

Jinou obraz degradující komponentou rekonstruovaného pole je virtuální obraz. Pokud je reálný a virtuální obraz dobře separovaný v oblasti prostorových frekvencí, můžeme potlačit tu polovinu spektra hologramu, která virtuálnímu obrazu náleží. Tato úprava je spíše kosmetická, neboť nyní virtuální obraz nijak neovlivňuje obraz reálný. V případě, kdy virtuální obraz překrývá obraz reálný, musíme použít sofistikovanější metodu pro jeho odstranění [1] nebo nepatrně zvětšit úhel mezi referenční a objektovou vlnou v našem měřicím uspořádání tak, abychom docílili lepší prostorově frekvenční separace reálného a virtuálního obrazu. Avšak Nyquistův teorém musí být stále dodržen. Po rekonstrukci vlnového pole  $U$  dle (5), kde použijeme filtrovaný hologram  $f_F$ , již dostáváme komplexní pole obsahující pouze užitečnou informaci o objektu (Obr. 1c).

Abychom se zbavili šumu, je možné na reálnou i imaginární část komplexního pole aplikovat konvoluční filtr

$$\text{Re}\{U_F\} = \text{Re}\{U\} * j \text{ resp. } \text{Im}\{U_F\} = \text{Im}\{U\} * j \quad (9)$$

s jádrem např.

$$j = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

kde operátor  $*$  představuje konvoluci. Z komplexního pole  $U_F$  nebo  $U$  již můžeme, dle vztahů (2), (3), vypočítat intenzitu objektu, či jeho fázi.

### Interferenční fáze modulo $2\pi$

Abychom mohli zkoumat deformaci (nebo jinou vlastnost) holografickou interferometrickou metodou, potřebujeme dva různé hologramy, z kterých získáme dvě komplexní pole  $U_1$ ,  $U_2$  již zmíněným postupem. Jeden hologram může odpovídat např. nedeformovanému předmětu, druhý předmětu deformovanému. Dalším krokem je výpočet interferenční fáze, která již přímo souvisí s danou změnou objektu. Abychom na konci získali relevantní výsledky, musíme dodržet některé požadavky. Geometrie našeho uspořádání se nesmí pro záznam jednotlivých hologramů změnit a stejně tak parametry použitého laseru musí být shodné.

Necháme-li spolu jednotlivá pole  $U_1$ ,  $U_2$  interferovat, dostáváme intenzitu společného interferenčního pole - holografický interferogram:

$$I = |U_1 + U_2|^2 = 2I_1(1 + \cos(\Delta\varphi)), \quad (11)$$

kde  $\Delta\varphi$  je rozdíl fází v daném bodě nazývaný fází interferenční. Vzniklý interferenční obrazec (11) odpovídá plynule se měnící intenzitě, která je závislá na interferenční fázi  $\Delta\varphi$ . Vznikají interferenční maxima pro  $\cos(\Delta\varphi) = 1$  a minima pro  $\cos(\Delta\varphi) = -1$ . V klasické HI je úkolem z tohoto obrazce získat hodnoty interferenční fáze v každém bodě interferogramu. Digitální HI umožňuje hodnotu interferenční fáze vypočítat přímo podle:

$$\Delta\varphi(n, m) = \arctan \frac{\text{Im}\{U_2(n, m)U_1^*(n, m)\}}{\text{Re}\{U_2(n, m)U_1^*(n, m)\}} \quad (12)$$

Jiný způsob výpočtu interferenční fáze je  $\Delta\varphi(n, m) = \varphi_2(n, m) - \varphi_1(n, m)$ , kde  $\varphi_i$  je vypočtená fáze daného komplexního pole ze vztahu (3). Zde je ovšem nutno kontrolovat, zdali je interferenční fáze

$$\Delta\varphi(n, m) \in [-\pi, \pi]$$

pro všechny body  $(n, m)$ . Pokud tomu tak není, je nutné odečíst popř. přičíst hodnotu  $\pi$ .

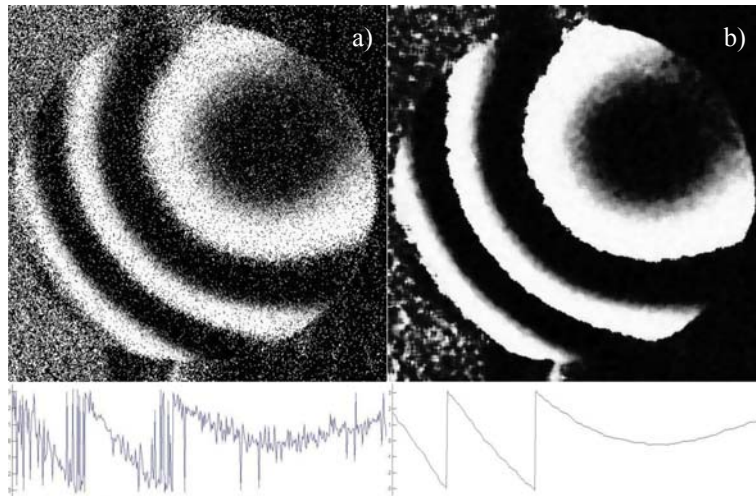
Vzhledem k nabývajícím hodnotám, které jsou v rozsahu  $2\pi$ , se tato fáze nazývá interferenční fáze modulo  $2\pi$  (Obr. 2). Interferenční fáze získaná digitální HI vykazuje šum, který je nejvíce způsoben specklovými obrazci. Existující šum může ovlivnit a značně ztížit popř. znehodnotit demodulaci fáze, která je nezbytná pro další výpočty. Proto je nezbytné vyhlazení interferenční fáze modulo  $2\pi$  procesem digitální filtrace. K demodulaci interferenční fáze je nutné zachovat ostrý přechod mezi maximem a minimem intervalu  $[-\pi, \pi]$ , tudíž možnost aplikace průměrovacích konvolučních či mediánových filtrů je značně omezená, neboť s rostoucí velikostí jádra filtrů klesá také rozdíl maxima a minima daného intervalu a ostré  $2\pi$  přechody se ztrácejí. Nabízí se zde použití sofistikovanějšího

filtru [2], který dostatečně vyhladí interferenční fázi a zároveň zachová ostré skoky  $2\pi$ . Nejprve spočítejme:

$$\begin{aligned} s(n, m) &= \sin(\Delta\varphi(n, m)) \\ c(n, m) &= \cos(\Delta\varphi(n, m)). \end{aligned} \quad (13)$$

Ačkoli  $\Delta\varphi$  je modulo  $2\pi$ , její komponenty  $s(n, m)$  a  $c(n, m)$  žádné ostré přechody neobsahují. Proto je možné vyhladit postupně tyto složky známými filtry, např. konvolučním (9), o vhodné velikosti jádra (10) a získáme nové, filtrované komponenty  $s_F(n, m)$  a  $c_F(n, m)$ . Filtrovanou interferenční fázi s ostrými  $2\pi$  skoky pak opět získáme:

$$\Delta\varphi_F(n, m) = \arctan \frac{s_F(n, m)}{c_F(n, m)}. \quad (14)$$



Obr. 2: Znázornění interferenční fáze a profilu prostředního řádku: a) Nefiltrovaný zašuměný obraz, b) filtrovaný obraz s detekovatelnými přechody  $2\pi$ .

### Rozbalení fáze

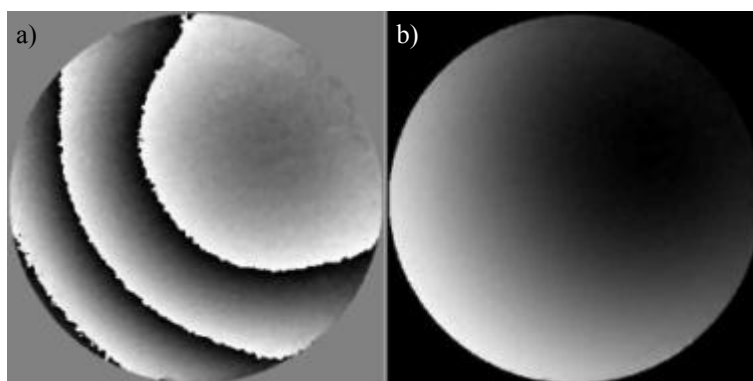
Abychom získali kontinuální fázové pole, je nutné interferenční fázi modulo  $2\pi$  demodulovat. Principem je nalézt body, kde fáze přechází  $2\pi$  skokem z hodnoty maxima na minimum či naopak a dalším hodnotám přičíst popřípadě odečíst hodnotu  $2\pi$ . Existuje několik způsobů, jak demodulaci fáze, často nazývanou také rozbalení fáze, realizovat. Nejjednodušší přístup je kontrolovat rozdíl sousedních hodnot fáze  $\Delta\varphi(n+1) - \Delta\varphi(n)$  při procházení fázového pole. Pokud je rozdíl menší než  $-\pi$ , přičteme dalším pixelům počínaje  $\Delta\varphi(n+1)$  hodnotu  $+2\pi$ . Pokud je rozdíl větší než  $+\pi$ , pak budeme hodnotu  $2\pi$  odečítat. Tento jednoduchý algoritmus je ovšem nerobustní, velmi náchylný na šum ve fázovém poli, neadaptabilní na lokální fázové poruchy (vzniklé např. maskováním). Vznikne-li při demodulaci chyba na jednom místě pole, všechny posléze spočtené hodnoty jsou touto chybou zatíženy. Z těchto důvodů je vhodnější volit složitější, avšak robustnější algoritmus.

Algoritmus použitý v aplikaci [4] interpretuje fázové pole jako graf, kde uzly jsou hodnoty daných pixelů  $\Delta\varphi(n, m)$  a spojnice mezi sousedními body je definována:

$$d(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2) = \min\{|\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2|, |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 + 2\pi|, |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 - 2\pi|\}. \quad (15)$$

Nyní se vytvoří cesta (mezi čtyřmi sousedními pixely), kde spojnice  $d$  nabývá nejmenších hodnot. Podle těchto cest je pravděpodobnost chybné demodulace nejmenší. Pixely s největší hodnotou – rezidua – jsou pak obklopeny vytvořenými cestami. Spojením reziduí s opačnými znaménky vytvoříme zlomy. Tyto zlomy označují místa, kde dochází k „překlopení“ fáze a přičtením násobků  $2\pi$  získáme

fázi rozbalenou. Tento algoritmus se nazývá Goldsteinův, byl převzat z [5] a upraven pro účely digitální HI.



Obr. 3: Vymaskovaná interferenční fáze: a)  $2\pi$  modulovaná, b) rozbalená kontinuální fáze.

### Vztah fáze a deformace

Výpočet fáze většinou není cílem, ale pouze nezbytným mezikrokem k získání kvantitativních hodnot jakými jsou pole posunutí, deformace, indexu lomu, atd.

Vytvořená aplikace je zaměřena na měření deformací. Předpokládejme, že objekt je neprůhledný a difúzně odrážející, pak každé posunutí bodu  $P$  dané deformací způsobuje prodloužení optické dráhy  $\delta(P)$ . Ta představuje rozdíl vzdáleností mezi cestami, které vlna urazí od optického zdroje - laseru ke zkoumanému objektu a po odražení do přijímače - CCD pro nedeformovaný a deformovaný stav objektu. Vztah mezi fází v bodě  $P$  a optickou dráhou procházejícím bodem  $P$  je dán:

$$\varphi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(P). \quad (16)$$

Označíme-li  $s(P)$  jednotkový vektor osvětlující bod  $P$  a  $b(P)$  jednotkový vektor, pod kterým bod  $P$  pozorujeme, dostáváme pro rozdíl optických drah

$$\delta(P) = d(P)[b(P) - s(P)], \quad (17)$$

kde  $d(P)$  je posunutí (deformace) bodu  $P$  mezi jednotlivými stavy. Pak tedy dostáváme finální vztah pro hodnotu interferenční fáze a vzniklé deformace:

$$\varphi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} d(P)[b(P) - s(P)]. \quad (18)$$

Výraz (18) je často interpretován:

$$\varphi(P) = S(P)d(P), \quad (19)$$

kde  $S(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [b(P) - s(P)]$  je nazýván vektor citlivosti. Ten odráží vlastnosti holografického uspořádání. Je zřejmé, že nejcitlivější uspořádání dostaneme v případě, kdy osvětlujeme zkoumaný objekt kolmo k povrchu či alespoň pod nejmenším úhlem k normále povrchu. Pak dostáváme:  $b(P) = (1,0,0)$ ,  $s(P) = (-1,0,0)$  a konečně pro citlivostní vektor:

$$S(P) = \frac{4\pi}{\lambda}. \quad (20)$$

Deformaci v daném bodě lze pak vypočítat podle vztahu:

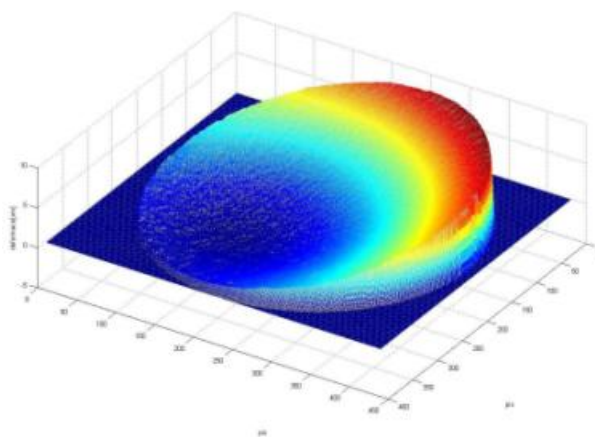
$$d(P) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(P). \quad (21)$$

I měření dalších vlastností objektů metodou HI je založeno na změně optické dráhy po přechodu do jiného stavu a souvislosti optické dráhy s interferenční fází podle (16).

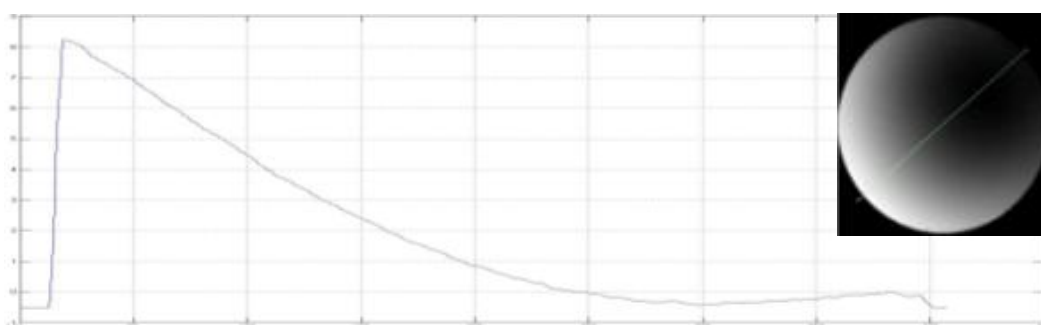
## Experiment

Pro ověření a demonstraci naší aplikace jsme měřili deformaci vzniklou na piezoelektrickém členu, který byl napájen různými velikostmi napětí. Pro každý stav byl digitální kamerou AVT Stingray s CCD senzorem o rozměrech pixelů  $3,45 \times 3,45 \mu\text{m}$  pořízen hologram (Obr. 1a). Libovolná dvojice hologramů pak sloužila jako hlavní vstupní data celé aplikace. Aplikace řeší jednotlivé výpočty s logickou návazností krok za krokem, jak je uvedeno pořadí v teoretickém úvodu. Po načtení hologramů má operátor možnost vyříznout libovolnou jejich část o požadované velikosti. Jelikož algoritmus rekonstrukce vlnového pole využívá rychlou Fourierovu transformaci (FFT), která pracuje s čtvercovými poli o velikosti  $2^n$ , doporučuje se oříznout hologram právě touto velikostí okna. V našem případě jsme ořízli hologramy z původních  $2452 \times 2056$  pixelů na čtvercové pole o straně 2048 pixelů. Nyní jsme již, po zadání parametrů uspořádání (vlnová délka koherentního zdroje, rozměry pixelů použitého senzoru atd.) a parametrů rekonstrukce (potlačení stejnosměrné složky, virtuálního obrazu atd.), spočítali komplexní vlnové pole pro oba hologramy představující rozdílné stavy a rozložení jejich intenzit (Obr. 1b,c) a fází. Ačkoli pole rozložení intenzity není pro výpočty v digitální HI nutné, její zobrazení nám pomůže určit, zdali je objekt správně zaostřen či není-li překrytý stejnosměrnou složkou popř. virtuálním obrazem. Z polí jednotlivých fází nejsme s to takto rozhodnout.

Následoval výpočet interferenční fáze modulo  $2\pi$  (Obr. 2a) s možností oříznutí nepotřebné části pole, filtrace sofistikovaným filtrem nebo maskováním libovolnými tvary. Po vyhlazení interferenční modulované fáze s ostrými přechody (Obr. 2b), jsme mohli fázi rozbalit a získat kontinuální, demodulovanou fázi (Obr. 3b). Po tomto následoval výpočet deformace (Obr. 4). Nyní má uživatel možnost vyhladit celé pole deformace konvolučním filtrem (9), zvolit referenční bod s příslušnou hodnotou deformace, zobrazit libovolně vedený profil deformace (Obr. 5) či vykreslit gradienty deformace a její ekvipotenciály.



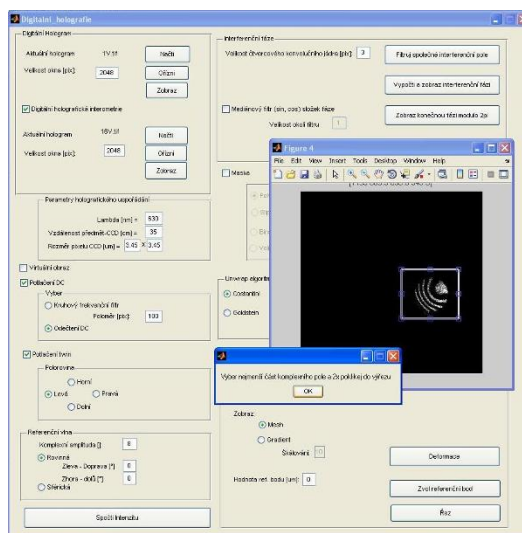
Obr. 4: Pole deformace piezoelektrického členu vzniklé rozdílem napětí mezi jednotlivými stavy (1V a 16V).



Obr. 5: Profil deformace středu piezoelektrického členu. Řez je veden, jak naznačuje úsečka na obrázku vpravo nahoře.

## Závěr

S využitím prostředků prostředí Matlab (Image processing toolbox, Graphical User Interface,...) byl vytvořen software pro vyhodnocování výsledků metody digitální HI (Obr. 6). Kromě zmíněného piezoelektrického členu byl úspěšně otestován mnoha dalšími praktickými aplikacemi s různými tvary deformací. Ačkoli hlavní motivací byl výpočet deformace zkoumaného objektu, úspěšně jsme získali také pole rozložení indexu lomu transparentního předmětu či jeho teplotní rozložení. V budoucnu bude aplikace rozšířena o možnost vyhodnocení hologramů získané z tzv. time-average HI využívané pro popis chování vibrujících povrchů.



Obr. 6: Ukázka uživatelského rozhraní.

## Literatura

- [1] C.P. McElhinney, B.M. Hennelly, T.J. Naughton: *Twin-image reduction in inline digital holography using an object segmentation heuristic* (Invited paper) In *Euro American Workshop in Information Optics, Institute of Physics, London 2008*.
- [2] Kreis T: *Handbook of Holographic Interferometry*, Wiley-Vch, 2005
- [3] Trager F.: *Springer Handbook of Lasers and Optics*, Springer 2007
- [4] T. M. Venema, J. D. Schmidt: "*Optical phase unwrapping in the presence of branch points*," **16**, 6985-6998 (2008).
- [5] *The MathWorks* [online]. 1994-2009. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22504/>>.
- [6] M. Liebling, Th. Blu, M. Unser, "*Non-Linear Fresnel Approximation for Interference Term Suppression in Digital Holography*," Proceedings of the SPIE Conference on Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing X, San Diego CA, USA, August 3-8, 2003, vol. 5207, pp. 553-559.

---

Bc. Pavel Psota  
E-mail: [pavel.psota@tul.cz](mailto:pavel.psota@tul.cz)

Ing. Vit Ledl Ph.D.  
E-mail: [vit.ledl@tul.cz](mailto:vit.ledl@tul.cz)

Ing. Jan Václavík  
E-mail: [jan.vaclavik@tul.cz](mailto:jan.vaclavik@tul.cz)

RSS FM TUL  
Studentska 2  
Liberec 46017  
tel: 00420 48 535 3609



