

# Posudek doktorské disertační práce

*Název práce:* Vyšetřování teplotních polí digitální holografickou interferometrií

*Disertant:* Ing. Roman Doleček

## Obsah práce

Předkládaná doktorská disertační práce se zabývá implementací digitální holografické interferometrie a jejím použitím pro vyhodnocování teplotních polí v proudící tekutině.

Práce je členěna do 8 číslovaných kapitol, úvodu, závěru a seznamu vlastní a použité literatury. Členění práce je přehledné a logické.

Cíle práce jsou formulovány v úvodní kapitole, kde je zároveň popsána motivace práce. V první kapitole jsou podány základní principy digitální holografické interferometrie, jsou definovány pojmy a fyzikální principy, které s touto metodou souvisí. Jsou objasněny základní pojmy, jako koherence či difrakce a také základní přístupy k praktické implementaci této metody, jako je Huygensův princip, Fresnel-Kirchhoffův difrakční přístup, Fresnelova či Fraunhoferova aproximace.

Druhá kapitola je věnována digitální holografii, jsou uvedeny způsoby implementace metody pomocí digitální techniky, jsou ukázány základní postupy při vyhodnocování obrazové informace. Speciální varianta této metody, kterou je digitální holografická interferometrie, je podrobně popsána v kapitole 3.

Ve 4. kapitole je ukázáno použití digitální holografické interferometrie pro měření změn indexu lomu v dané oblasti. Dále jsou stručně představeny experimenty z oblasti neizotermního proudění tekutin, ve kterých disertant prakticky uplatnil vybranou metodu.

V další kapitole je navrženo optimální uspořádání měřící aparatury při splnění požadavků experimentů z oblasti mechaniky tekutin. Je zde uveden Mach-Zenderův interferometr a dále Twyman-Greenův interferometr, který byl vybrán jako optimální varianta při digitální implementaci metody z důvodů vyšší citlivosti.

V následujících kapitolách jsou uvedeny výsledky získané pomocí metody digitální holografické interferometrie. Úlohy jsou rozděleny podle charakteru proudění na kontinuální a periodicky proměnné teplotní pole. První případ je reprezentován izolovaným paprskem ohřátého vzduchu a třemi přilehlými paprsky. Druhý případ je potom realizován pomocí syntetizovaného paprsku s jedním a se dvěma výstupy kruhového průřezu. Časově proměnná pole jsou studována pomocí metody fázového středování. Výsledky měření metodou digitální holografické interferometrie jsou srovnány s měřením pomocí studeného drátku metodou CCA, kdy byla měřená oblast protraverzována a ve vybraných bodech určena teplota proudu.

Protože použitá implementace Twyman-Greenova interferometru byla omezena na malou oblast v prostoru, byl v kapitole 8 navržen způsob rozšíření měřicí oblasti interferometru pomocí optického expandéru. Tato varianta byla vyrobena a vyzkoušena.

V závěru je shrnuta řešená problematika a dosažené výsledky.

## **Význam pro obor**

V mechanice tekutin je běžně používán Mach-Zenderův interferometr pro zkoumání oblastí s proměnnou hustotou plynu. Tato metoda má nevýhody ve složitém zpracování vyhodnocení a dále ve skutečnosti, že při ní dochází ke ztrátě informace ve směru prosvětlení vzorku. Metoda totiž způsobuje průměrování informace o hustotě v tomto směru. Navrhovaná implementace digitální holografické interferometrie pomocí Twyman-Greenova interferometru tyto nevýhody do značné míry odstraňuje. Metoda umožňuje prostorové zobrazení pole hustoty plynu a jeho detailní studium.

## **Postup řešení, použité metody, splnění vytčeného cíle**

Práce má logickou stavbu, obsahuje teoretický rozbor fyzikálních jevů a použitých experimentálních metod, popis zkoumaného případu a výsledky měření na definovaném příkladu.

Metody použité pro řešení zadaného problému jsou dle mého názoru voleny správně. Také jejich aplikace na řešení konkrétních případů je správná. Autor uvádí obsáhlou bibliografii, v práci se odkazuje na použité zdroje informací.

V práci jsem postrádal podrobnou analýzu odhadu chyb vyhodnocených teplotních (hustotních) polí. Zejména v případě vyhodnocení prostorové informace chyby jistě závisí na způsobu měření a na volbě počtu obrazů. S tím souvisí prostorová rozlišitelnost/chyba této metody.

Cíle disertace definované v úvodu práce, byly dle mého názoru beze zbytku splněny.

## **Význam výsledků, přínos disertanta.**

Disertantovi se v práci podařilo úspěšně implementovat moderní optickou metodu, která je schopna poskytnout nové informace o zkoumaném ději. Metodu ověřil na několika praktických případech proudových neizotermních polí. Disertant prokázal použitelnost digitální holografické interferometrie při řešení úloh z mechaniky plynů v případech, kdy dochází ke změně hustoty plynu ve sledované oblasti.

## **Formální stránka práce**

Po formální stránce je práce na velmi dobré úrovni, grafická úprava je odpovídající, kvalita obrázků je také dobrá. Práce je přehledná, obsahuje všechny požadované části.

Členění práce je logické a systematické.

## **Publikace disertanta**

Seznam publikací, kterých je disertant autorem či spoluautorem, je velmi obsáhlý, vesměs se jedná o příspěvky na mezinárodní konference v anglickém jazyce. Ne všechny publikace uvedené v seznamu se vztahují k řešenému tématu.

## **Závěr**

Předložená disertační práce svědčí o faktu, že se disertant dlouhodobě zabývá moderními optickými metodami a jejich implementací. Podařilo se mu vyvinout, sestavit a odzkoušet unikátní aparaturu, která je použitelná pro různé úlohy z oblasti mechaniky tekutin a termodynamiky. Předkládaná práce obsahuje všechny potřebné části, od teoretického rozboru, popis stávajících metod, návrh nové metodiky a její ověření na vybraném příkladu.

Disertant prokázal dobrou orientaci v oblasti návrhu, přípravy i provádění experimentů v oborech mechaniky tekutin a optiky také schopnost aplikovat znalosti obecného charakteru na řešení konkrétního případu.

**Předkládaná práce podle mého názoru splňuje požadavky dle zákona č.111/1998 Sb. §47. Práci proto doporučuji k obhajobě.**



## Dotazy

- Metoda interferometrie mapuje rozložení indexu lomu ve sledované oblasti. Ten je u plynů funkcí hustoty, která potom závisí na teplotě a tlaku. Tlak se v proudovém poli významně mění u stlačitelného proudění. Je navrhovaná metoda použitelná i pro tento případ?
- Proč byla pro určení střední teploty v bodě použita metoda studeného drátku CCA? Tato metoda je primárně určena pro měření fluktuací teploty, pro vyhodnocení její časově střední hodnoty existují vhodnější metody.

V Praze dne 30.11.2015



Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.



Posudek disertační práce Ing. Romana Dolečka

### Vyšetřování teplotních polí digitální holografickou interferometrií

Disertační práce se zabývá použitím digitální holografické interferometrie ke studiu teplotních polí. Téma práce je aktuální a poměrně nové. Navazuje na dlouholeté zkušenosti, které s holografií mají v laboratoři optických metod měření Technické univerzity v Liberci. Rozvoj této metody je užitečný pro průmyslové a vědecké aplikace, ve kterých dochází k proudění tepla. Metoda umožňuje verifikaci návrhů a simulací zařízení, využívajících proudění plynů, pomůže při optimalizaci inženýrských systémů. Z vědeckého hlediska je projekt standardně náročný.

První tři kapitoly jsou úvodem do studované problematiky. Zde jsou podrobně a logicky na velmi dobré úrovni popsány základy holografické interferometrie. Tato část bude určitě dobrým studijním textem pro další studenty doktorského či magisterského studia, kteří budou v rozvoji metody a jich aplikacích pokračovat. Tato teoretická část je velmi kompaktní a je dobře sepsána. Vyskytují se ale i drobné nepřesnosti. Na straně 14 je popisována interference dvou vln se stejnou vlnovou délkou, ale s rozdílnou frekvencí. Tvzení na straně 16, že světlo s velkou koherenční délkou je nazýváno vysoce monochromatické, také není přesné. Na straně 36 je nevhodně použito slovo pravoúhle - "difrakce světla vlny dopadající pravoúhle na holografickou mřížku". Na straně 51 „Gladstone – Daleova konstanta je závislá na teplotě a tlaku a nepatrně na vlnové délce“ - tato konstanta je závislá na vlnové délce a druhu plynu (koncentraci nečistot atd.), ale závislost na teplotě a tlaku je v příslušných rovnicích vyjádřena pomocí veličiny hustoty.

Čtvrtá kapitola popisuje některá využití metody digitální holografické interferometrie pro měření změn indexu lomu a tím i teplotních polí.

Těžiště práce je v experimentální části. Doktorand se významně podílel na přechodu zaměření laboratoře od klasické holografie, se záznamem na holografické SHE desky, k digitálnímu záznamu hologramů. Zde byl při řešení vytyčeného úkolu použit jasný postup. Byly navrženy a optimalizovány metody měření. Byla navržena a odzkoušena sestava modifikovaného Twyman- Greenova interferometru, umožňující zdvojnásobit citlivost aparatury. Bylo vyvinuto externí spouštění kamery, synchronizované se sledovaným dějem. Velice užitečné a originální bylo zavedení rotačního stolku do sestavy Mach –Zehnderova interferometru: To umožnilo vyšetřování nesymetrických teplotních polí a podstatné zkrácení doby takovýchto měření.

Předložená práce je po formální stránce velmi dobré kvality. Je vhodně členěna do jednotlivých kapitol. Obsahuje množství obrázků, fotografií a grafů, které vhodně doplňují text. Všechny obrázky jsou velmi



přehledné a ilustrativní. Popisky obrázků jsou dostatečné a přesné, odkazy na obrázky jsou správně umístěny v textu. Velké množství rovnic je vysázeno pečlivě a přesně. Pouze v rovnici (26) chybí druhá mocnina a v rovnici (28) – chybí znak integrálu, na straně 20 v textu je v exponentu veličina  $\rho'$  špatně ve jmenovateli, v dalším vztahu na stejné stránce pod odmocninou chybí znak +. V rovnici (45) jsou pro MTF opačně uvedeny indexy kontrastů, které jsou zde navíc označeny písmenem  $M$ , když předtím byl použit symbol  $V$  – rovnice (24). Chybí seznam symbolů, i když symboly veličin jsou v textu dobře uvedeny. Ale např. v rovnici (48) není jasné, co znamenají symboly veličin  $\beta$  a  $\tau$ .

Pravopisné chyby a překlepy se vyskytují sporadicky, např. lze –lez na stranách 23 a 70, pravopisné chyby - str. 23 více, str. 44 vyplívá. Někde chybí čárky, jako interpunkční znaménka, oddělující vložené věty. V úvodním prohlášení se dvakrát vyskytuje termín diplomová práce, místo disertační práce.

Odborná terminologie je používána správně. Ne moc přesně je definována kvantová účinnost na straně 28 a vyčítací (v práci označený jako čtecí) šum na straně 29.

Seznam literatury je dostatečný, práce jsou vesměs citovány korektně, u některých zdrojů, např. 30 - 35, 46 chybějí údaje o stránkách článku, u 39 chybí ISBN. Číslování odkazů na literaturu v textu začíná čísly 13 a 14.

Na doktoranda mám tento dotaz:

1. Pro měření bylo použito uspořádání modifikovaného Twyman-Greenova interferometru, které je popsáno například na straně 64, obrázek 25. Jaká je jeho výhoda oproti použití klasického uspořádání Twyman-Greenova interferometru s jedním děličem? Používáte polarizující dělič  $BS_1$ , takže v referenční a měřicí větvi jsou ortogonální polarizace?
2. Jak jste se podílel na vývoji použitých algoritmů a programů, a jak na analýze získaných hologramů?

Z předložené práce je vidět, že autor si studovanou problematiku plně osvojil, a že vykonal i množství experimentální práce. Autor zároveň aktivně přispěl k rozvoji tohoto oboru, o čemž svědčí i uvedený seznam poměrně velkého počtu publikací, kde je autorem, nebo spoluautorem.

Předložená disertační práce Ing. Roman Dolečka je kvalitní. Autor prokázal předpoklady k samostatné vědecké práci. Práce přispívá k rozvoji metody digitální holografické interferometrie a k jejímu využití pro analýzu teplotních polí.

Doporučuji přijetí předložená práce k obhajobě.

v Liberci, dne 26.11.2015



doc. RNDr. Miroslav Šulc, PhD.

