

Oponentní posudek habilitační práce

Measurement uncertainty of optical 3D sensors on optically smooth and rough surface

autor habilitační práce: RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D., SLO, FÚ AV ČR, Olomouc

habilitační řízení v oboru: Optika a optoelektronika

Předložená habilitační práce je zaměřena do oblasti na aplikované optiky a metrologie. Z hlediska technické praxe je měření geometrie různých objektů velmi důležitou oblastí, zvláště v současnosti, kdy je vyžadováno soustavné zvyšování rychlosti a kvality produkce. Dlouhou dobu byly v těchto měřicích úlohách preferovány systémy založené na mechanických principech (kontaktní senzory), protože vykazovaly dobrou spolehlivost, vysoké laterální rozlišení a nízké hodnoty nejistot měřených veličin. Na druhé straně k jejich nevýhodám patří nutnost měřit tvary testovaného objektu bod po bodu, což vyžaduje mít k dispozici dostatečně dlouhou dobu pro měření. To znamená, že pro rychlou a soustavnou kontrolu tyto měřicí systémy nejsou vhodné. Řešením tohoto problému jsou bezkontaktní měřicí systémy, mezi kterými hrají důležitou roli optické senzory umožňující měření geometrie testovaných objektů ve všech třech rozměrech. Oproti mechanickým sensorům je požadovaná informace většinou získána najednou ve mnoha bodech - optickou detekcí je tedy možnou považovat za metodu „paralelní“. Na druhou stranu se však jedná o nepřímá měření, kde je informace obsažena ve výsledném optickém poli, a k jejímu získání je třeba sofistikovaných metod. Velmi důležitou oblastí je stanovení nejistot takového měření s ohledem na použitou měřicí strategii. Právě tato oblast je tématem posuzované habilitační práce.

Předložená práce představuje souhrn významných výsledků uchazeče, získaných v období od roku 2003 do současnosti, a je založena na souboru vědeckých prací, které byly publikovány většinou v mezinárodních časopisech s impaktním faktorem (IF), a ve sbornících z mezinárodních konferencí. Samotný text v rozsahu 55 stran je rozdělen do šesti kapitol. V úvodní kapitole autor stručně shrnuje současný stav poznání v oblasti 3D optických sensorů se zaměřením na nejistoty měření. Jelikož byl autorův výzkum zaměřen hlavně na problémy stanovení povrchové drsnosti, je vymezení těchto pojmů věnována kapitola druhá. Teoreticky jsou rozebrány dva hlavní případy: opticky hladké a drsné povrchy. Následující kapitola je věnována vlivu šumu na měřicí proces. V dalších dvou kapitolách se autor podrobněji věnuje dvěma zmíněným případům drsných povrchů. Veškeré výsledky jsou pak krátce shrnuty v poslední kapitole.

Jádrem práce jsou kapitoly dvě až pět. Součástí druhé kapitoly je také analýza statistických vlastností pole koherenční zrnitosti. Popis je proveden metodami vlnové optiky. Původní analýza zobrazení drsného povrchu systémem se dvěma čočkami byla omezena na případ, kdy velikosti apertur obou čoček byly malé. Autor tuto analýzu provedl tak, aby toto omezení bylo odstraněno a dospěl k originálním výsledkům, kterými jsou vztahy pro variance a střední hodnoty reálné a imaginární části optického pole v rovině detektoru. Následný rozbor vede ke kritériu pro rozlišení mezi opticky hladkými a drsnými povrchy, a je též vymezen přechodový režim mezi oběma případy. Výsledky uvedené v této kapitole nejsou ještě publikovány a práce ([Pavlíček, 2021] - viz seznam literatury) je ještě zřejmě v recenzním řízení, popř. v tisku.

V následující kapitole se autor zabývá možným vlivem šumu na výsledky a nejistoty měření. Výklad je veden pomocí teorie signálu a matematické statistiky. Je samozřejmě žádoucí aby nejistoty byly minimalizovány, avšak existuje určitá mezní hodnota, pod kterou se nelze dostat. Lze ji obecně odhadnout pomocí Cramér-Raovy nerovnosti. Autor se této problematice věnoval ve svých publikacích označených v práci jako A1 až A4, které jsou zaměřeny na použití Hilbertovy transformace při vyhodnocení výsledků získaných metodou širokospektrální interferometrie. Opět se jedná o originální výsledky publikované autorem v časopisech *Measurement Science and Technology*, *Optics and Lasers in Engineering*, *Applied Optics* a v rámci mezinárodní konference série *SPIE*. V samotné kapitole je pak pro ilustraci odvozen výraz pro Fisherovu informaci v případě že je měření ovlivněno výstřelovým šumem. Tuto kapitolu, spolu s kapitolou č.2, lze považovat za teoretická východiska uplatněná v kapitolách následujících.

Čtvrtá kapitola je věnována nejistotám měření v případě, že povrch lze považovat za opticky hladký. Autor zde předpokládá, že za ideálních podmínek je jediným zdrojem šumu je výstřelový šum, který je dán samotným procesem fotodetekce. Dolní odhad nejistoty určované souřadnice je

proveden pomocí Cramér-Raovy nerovnosti, která je vyjádřena pomocí optické intenzity. Tento obecný postup je poté aplikován na dvoušterbinovou měřicí konfiguraci. Výsledkem jsou vztahy odvozené pro nejistotu jak laterální, tak longitudinální souřadnice. Je zde také naznačena souvislost mezi a klasickou interferometrií. Společným rysem je dvousvazková interference. Analýza je pak rozšířena na případ apertury obecného tvaru. Autor se dále zabývá obecným vztahem mezi spektrální hustotou a signálem daným optickou intenzitou. Výsledkem je dolní odhad velikosti nejistoty, který je v případě výstřelového šumu dán celkovým počtem fotonů. Účelem této analýzy je naznačit postup, kterým je možno přejít od zjednodušených modelů k reálným měřicím konfiguracím. Kapitulu lze považovat za shrnutí autorových původních výsledků (A5-A7), publikovaných v časopisech *Measurement Science and Technology*, *International Journal of Optomechatronics*, a na mezinárodní konferenci série *SPIE*.

V páté kapitole autor zaměřuje svou pozornost na druhý krajní případ, kdy se jedná o opticky drsný povrch. V tomto případě dochází ke vzniku pole koherenční zrnitosti a dominuje vliv povrchové drsnosti (objektový šum). Jako modelový případ autor analyzuje sestavu pro skenovací koherenční interferometrii. Za předpokladu použití širokopásmového zdroje světla s Gaussovým průběhem frekvenčního spektra autor odvodil výraz popisující vztah mezi neurčitostí měřené longitudinální souřadnice a kvadratickou drsností. Tento vztah byl sice již v minulosti odvozen, avšak autor k němu dospěl odlišným způsobem. Tato analýza je založena na již publikovaných původních výsledcích (viz publikace A8 a A10). Při vyhodnocování interferogramů získaných za použití širokopásmových zdrojů hraje důležitou roli obálka. Povrchová drsnost však může vést k situacím, kdy je tvar obálky narušen. Autor se tímto případem zabývá pomocí jistého kritéria navrženého v publikaci A9. Je navržen vztah mezi limitní koherenční délkou použitého zdroje a kvadratickou drsností. Závěry jsou podpořeny numerickými výpočty. Ukazuje se, že z hlediska minimalizace nejistot je výhodnější provádět měření pomocí světlých oblastí pole koherenční zrnitosti. Výsledky obsažené v této kapitole mají důležitý význam pro praktická měření. Kapitola je postavena na dvou publikacích v časopise *Applied Optics* a jednom příspěvku na mezinárodní konferenci série *SPIE*.

Po prostudování předložené práce lze konstatovat, že autorem zvolené postupy a metody zpracování jsou přiměřené cílům práce a odpovídají současnému stavu poznání v dané oblasti. Autor systematicky spojuje experimentální a teoretické postupy s cílem získat výsledky aplikovatelné v oblasti optické metrologie drsných povrchů. Habilitační práce obsahuje původní a hodnotné výsledky, které již přispěly a jistě v budoucnu přispějí k dalšímu rozvoji zmíněného oboru. Náročnost řešení problematiky také zjevně ukazuje na výraznou vědeckou erudici uchazeče. Po formální stránce je práce napsána srozumitelně a přehledně, při čtení jsem nenarazil na žádné nepřesné formulace či překlepy. Pokud mohu posoudit, je autorova angličtina na velmi solidní úrovni. Práci tedy hodnotím jako zdařilou, a podle mého názoru neobsahuje žádné nedostatky které by byly překážkou v pokračování habilitačního řízení. **Doporučuji** tedy, aby byla práce **přijata k obhajobě**.

Do diskuze navrhuji tyto otázky:

1. Na několika místech (v kapitolách 2 a 5) autor předpokládá, že odrazivost měřeného povrchu je rovna jedné. Jakým způsobem by mohly být autorem odvozené výsledky ovlivněny v případě, že je odrazivost menší než jedna?
2. Setkal se autor s korelací výsledků získaných zmíněnými metodami s výsledky které byly v případě povrchové drsnosti získány pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM)?

V Ostravě, dne 16.7.2021

doc. RNDr. Dalibor Ciprian, Ph.D.
VŠB–Technická univerzita v Ostravě
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra fyziky
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava
e-mail: dalibor.ciprian@vsb.cz