

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření rotace zkoumaného předmětu v opticky volném
a obrazovém poli pomocí metody korelace polí koherenční
zrnitosti**

Vypracovala: Jana Koloničná

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.

Obor: Optika a optoelektronika

Forma studia: prezenční

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Pavla Horvátha, Ph.D. a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne 10. 5. 2010

.....

Jana Koloničná

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce RNDr. Pavlu Horváthovi, Ph.D. za čas věnovaný konzultacím a za podnětné připomínky a nápady během vzniku této práce.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Jana Koloničná
Název práce:	Měření rotace zkoumaného předmětu v opticky volném a obrazovém poli pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti
Typ práce:	bakalářská
Pracoviště:	Společná laboratoř optiky University Palackého a Fyzikálního ústavu akademie věd České republiky
Vedoucí práce:	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2010
Počet stran:	38
Počet příloh:	3
Jazyk:	český
Klíčová slova:	koherenční zrnitost, korelace polí koherenční zrnitosti, bezkontaktní měření, rotace předmětu, volné pole, obrazové pole

Abstrakt: Seznámení s optickým jevem koherenční zrnitost a jeho základními vlastnostmi a aplikacemi v moderní metrologii. Náplní této práce je popis bezkontaktní měřicí metody využívající korelace polí koherenční zrnitosti pro měření rotace předmětu. Využitím této metody je proveden experiment s cílem srovnat možnost detekce rotace zkoumaného vzorku ve volném a obrazovém poli. Cílem této práce je realizovat všechny základní etapy experimentu, tj. přípravu na experiment, vlastní realizaci experimentu a vyhodnocení experimentu.

Bigliographical identification:

Author:	Jana Koloničná
Title:	Rotation measurement of an object under investigation in free space and image field by speckle correlation method
Type of thesis:	Bachelor
Department:	Joint Laboratory of Optics of Palacky University and Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic
Supervisor:	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
The year of presentation:	2010
Number of pages:	38
Number of appendices:	3
Language:	Czech
Keywords:	speckle, speckle correlation, non-contact measurement, object rotation, free space, image field

Abstract: Introduction to an optical phenomena of speckle, its properties and applications in modern metrology. The aim of this work is to describe non-contact measurement method that uses speckle correlation method for an object rotation measurement. With the usage of this method, comparison of rotation measurement in the free space and the image field will be conducted. The main goal is to perform all stages of an experiment, i.e. preparation of an experiment, execution of the particular experiment and final data evaluation.

Obsah

Úvod.....	1
1. Teorie experimentu	2
1.1. Popis koherenční zrnitosti	2
1.2. Metody pro pozorování a záznam koherenční zrnitosti	4
1.2.1. Fotografie na bázi koherenční zrnitosti (speklová fotografie)	4
1.2.2. Korelační metoda na bázi koherenční zrnitosti	5
1.3. Popis experimentální sestavy	6
1.3.1. He-Ne laser	6
1.3.2. CMOS kamera	7
1.3.3. Rotační stolek	7
1.4. Určení nejistoty měření	8
1.4.1. Nejistota měření složky rotace ω_y ve volném poli	9
1.4.2. Nejistota měření složky rotace ω_y v obrazovém poli.....	15
1.5. Korelační analýza	22
2. Realizace experimentu	23
2.1. Měření rotace ω_y předmětu ve volném poli.....	23
2.2. Měření rotace ω_y předmětu v obrazovém poli.....	26
3. Vyhodnocení experimentu.....	28
Závěr.....	31
Seznam použitých zdrojů	32
Seznam použitých fyzikálních veličin.....	33
Seznam příloh.....	35

Úvod

Předložená bakalářská práce je zaměřena na optickou měřicí metodu z oblasti současné fyziky. Metoda korelace polí koherenční zrnitosti je nedestruktivní a nekontaktní měřicí metoda, která si našla své místo v moderní metrologii. Je zajímavé, že jev koherenční zrnitosti, na kterém je tato metoda založena, byl původně považován za nežádoucí, ale v poslední době nachází široké uplatnění ve vědě i průmyslu.

Koherenční zrnitost se využívá, například, v průmyslu k měření mechanické charakteristiky stavu těles, tedy posunutí nebo rotace zkoumaného předmětu, nebo jeho drsnosti. V optice jde o optické zpracování (kódování či dekódování) informací [1]. V astronomii se díky koherenční zrnitost měří průměry hvězd a úhlové vzdálenosti dvojhvězd. Dokonce nachází uplatnění v moderním lékařství, kde se pomocí koherenční zrnitosti měří refrakční vlastnosti lidského oka. Samotná metoda korelace polí koherenční zrnitosti se využívá, například, v biofyzice, optice a mechanice. V biofyzice nám umožňuje monitorování růstu rostlin, optika je díky ní obohacena o nový způsob měření indexu lomu kapalin, v mechanice se pak postarala o zdokonalení měření deformací zkoumaných předmětů [1, 2, 3].

Cílem bakalářské práce je provést experiment pro měření rotace zkoumaného předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti v opticky volném a obrazovém poli. Seznámit se s bezkontaktní měřicí metodou a provést všechny etapy experimentu, tj. přípravu na experiment, vlastní realizaci experimentu a vyhodnocení dosažených výsledků měření.

Práce je členěna na tři hlavní kapitoly. Teorii, realizaci a vyhodnocení experimentu. Součástí každého oddílu jsou podkapitoly, které se podrobně zaměřují na řešené problémy.

1. Teorie experimentu

1.1. Popis koherenční zrnitosti

Koherenční zrnitost (anglicky speckle) je trojrozměrný interferenční jev, ke kterému dochází ozářením, respektive odrazem koherentního světelného svazku od drsného povrchu předmětu [1]. Mikroskopické složky povrchu předmětu jsou podle Huygensova-Fresnelova principu zdrojem sekundárních kulových vln [4]. Tyto sekundární vlny spolu interferují a vytvářejí tak interferenční pole, respektive pole koherenční zrnitosti. Strukturu koherenční zrnitosti zaznamenáme příčným řezem tohoto pole, nejlépe vložení stínítka nebo detektoru. Na stínítku tak vidíme složitou strukturu koherenční zrnitosti a to v podobě světlých a tmavých skvrn, někdy též nazývané jako zrna. Každá skvrna nebo skupina skvrn mají určité statistické vlastnosti, které po vyhodnocení dávají informaci o předmětu [1].

Jev koherenční zrnitosti vzniká při

- odrazu koherentní světelné vlny od drsného povrchu předmětu,
- při průchodu koherentní světelné vlny fázovým předmětem s drsným rozhraním,
- při průchodu koherentní světelné vlny prostředím s náhodnými fluktuacemi indexu lomu.

Pokud se světlo šíří ve volném prostředí mluvíme o *objektivní koherenční zrnitosti*. Ta je ovlivněna světelným koherenčním svazkem, vlastnostmi osvětleného drsného povrchu předmětu a geometrickým uspořádáním osvětleného předmětu, zdroje záření a detektoru. Jestliže do prostoru mezi zkoumaný předmět a detektor vložíme optický systém, například spojnu čočku, mluvíme o tzv. *subjektivní koherenční zrnitosti*. Struktura koherenční zrnitosti tak navíc závisí na vlastnostech vloženého optického systému.

Pole koherenční zrnitosti můžeme považovat jako náhodné prostorové rozložení komplexní amplitudy světla a tedy i intenzity světla [1]. Vzhled a velikost koherenční zrnitosti záleží na stupni koherence γ_{12} dopadajícího světla, na jeho polarizaci a na vlastnostech rozptylujícího prostředí. Pro zcela koherentní záření odpovídá stupeň koherence γ_{12} jedničce. Vizibilita (viditelnost) zrn ve struktuře koherenční zrnitosti je maximální. Naopak pro zcela nekoherentní záření stupeň koherence γ_{12} odpovídá nule a koherenční zrnitost nepozorujeme. Jako zdroj záření pro vznik pole koherenční zrnitosti lze nejlépe použít laser, protože právě laserové světlo nejlépe splňuje podmínku koherence [4].

Budeme-li předpokládat úplně koherentní a polarizované světlo, potom pole koherenční zrnitosti vzniká v celém poloprostoru před předmětem a intenzita v libovolném bodě pole koherenční zrnitosti se řídí exponenciálním pravděpodobnostním rozložením a fáze má rovnoměrné pravděpodobnostní rozložení na intervalu $(-\pi, \pi)$ [1].

Jev koherenční zrnitosti můžeme zkoumat z různých úhlů pohledu. Jako první nás jistě napadne, co ovlivňuje velikost zrn, jaká velikost zrn je pro experimentální měření optimální a jakým způsobem ovlivní vložený optický systém strukturu koherenční zrnitosti. Na tyto otázky nemůžeme jednoznačně odpovědět, ale pomocí již zmíněných základních

statistických vlastností, které popisují pole koherenční zrnitosti, můžeme odvodit např. střední velikost zrn.

Velikost zrn ve struktuře koherenční zrnitosti je dána vztahem [1]

$$\delta = 1,22 \frac{\lambda L_0}{D}, \quad (1)$$

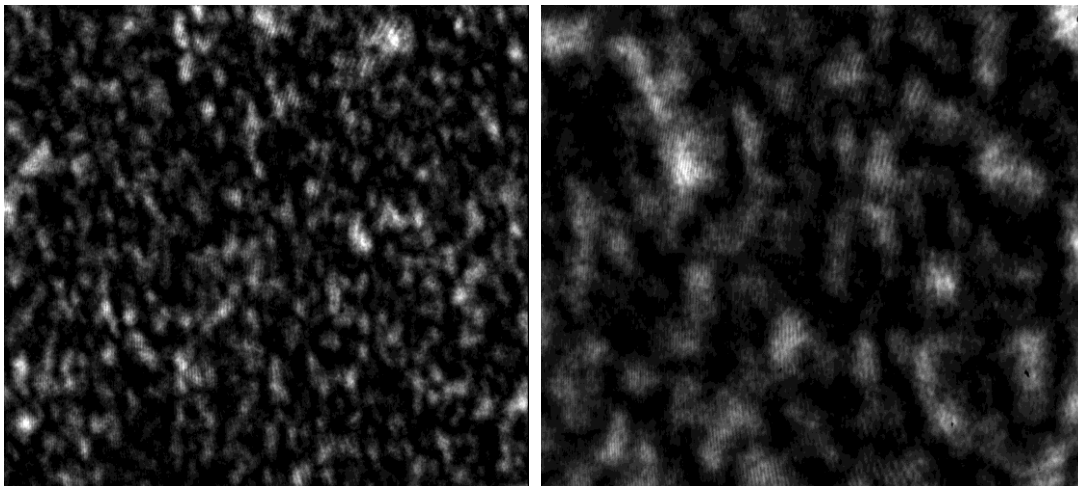
kde δ je střední velikost průměru zrn, λ je vlnová délka koherentního zdroje záření, L_0 je vzdálenost předmětu od detektoru a D je průměr osvětlené plochy povrchu předmětu.

Jestliže vložíme mezi ozařovaný předmět a detektor spojnu čočku, respektive mezi první a druhé stínítko, bude pozorovaný obrazec záviset na parametrech čočky. Výsledný vztah pro střední velikost průměru zrn má následující tvar [5]

$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{N.A.}, \quad (2)$$

kde δ je opět střední velikost průměru zrn, λ je vlnová délka koherentního zdroje záření, $N.A.$ je efektivní numerická apertura čočky. Na Obr. 1 můžeme porovnat strukturu koherenční zrnitosti ve volném a obrazovém poli. Na první pohled je jasně patrný rozdíl ve velikosti zrn.

Zmiňovaný optický systém zvětší strukturu koherenční zrnitosti jako lupa. Detektor, který zaznamenává tuto strukturu, rozlišuje větší zrna. Měření tak podle všech předpokladů zvýší svoji citlivost a rozlišení u detekované veličiny. Ověření těchto předpokladů při měření rotace zkoumaného předmětu je cílem prezentovaného experimentu.



a)

b)

Obr. 1: Záznam struktury koherenční zrnitosti a) ve volném poli, b) v obrazovém poli

Z historického hlediska byl jev koherenční zrnitosti považován za nežádoucí. Struktura koherenční zrnitosti byla poprvé pozorována již v 18. století při interferenci v rozptýleném světle. V následujících letech byla struktura koherenční zrnitosti zaznamenána při Fraunhoferově difrakci na skleněné desce pokryté malými částicemi

prachu (Exner 1877, Von Laue 1914). S rozvojem laserů v 60. letech 20. století došlo k významnému posuvu ve vývoji vysoce koherentních svazků. Rozvíjela se, například, holografie, kde se koherenční zrnitost projevovala jako parazitní jev. Způsobovala šum při rekonstrukci záznamu. V pozdějších letech se vědečtí pracovníci snažili naopak tento jev zkoumat, namísto snahy odstranit veškeré projevy koherenční zrnitosti. Výzkum se zaměřil na samotné studium vlastností koherenční zrnitosti a na využití tohoto jevu v praxi [1,5].

Významný krok ve studiu koherenční zrnitosti zaznamenal profesor I. Yamaguchi. Ve své průkopnické práci se zabýval popisem šíření polí koherenční zrnitosti a následným využitím posuvu a dekorelací těchto polí k detekci malé deformace na povrchu předmětu ve volném poli a obrazovém poli [6]. Na jeho práci navázal tým profesora M. Hrabovského, který zkoumal vlastnosti této měřicí metody především pro případ obrazového pole [7]. V předložené bakalářské práci sledujeme jejich odvozené vztahy, které pak experimentálně ověříme v laboratoři při měření malé rotace zkoumaného předmětu.

1.2. Metody pro pozorování a záznam koherenční zrnitosti

V této podkapitole si popíšeme, jakým způsobem se pozoruje a zaznamenává pole koherenční zrnitosti a jak je tento způsob využit v optické metrologii. V praktické realizaci existují dva typy metody detekce. Dělíme je podle způsobu záznamu na *fotografickou a optoelektronickou (fotodetektory)* [1]. K podrobnějšímu popisu si vybereme ty, které patří mezi významné měřicí metody v současné fyzice.

1.2.1. Fotografie na bázi koherenční zrnitosti (speklová fotografie)

Při užití této metody je pole koherenční zrnitosti, vznikající odrazem koherentních divergentních laserových svazků od zkoumaného povrchu předmětu, zobrazeno pomocí čočky na fotografickou desku. Zaznamená se přitom pole koherenční zrnitosti před a po deformaci předmětu (např. rotaci, translaci). Záznam tedy obsahuje obě pole koherenční zrnitosti, která jsou vzájemně posunutá. V praxi může nastat situace, kdy je na fotografické desce proveden dvouexpoziční záznam, ale pole jsou identická, nebo jen nepatrně posunutá (méně než střední velikost zrna). V tomto případě nedochází k žádné deformaci předmětu, nebo je deformace tak malá, že ji nedovedeme pomocí této metody rozlišit. Pokud jsou pole rozdílná a my pozorujeme i nepatrné odlišnosti, měříme tzv. malé deformace zkoumaného předmětu [1].

Dalším krokem měřicí metody, který nás přivede k rekonstrukci obrazu je následné vyvolání a osvětlení fotografické desky. Již vyvolaná fotografická deska se záznamem pole koherenční zrnitosti před a po deformaci (někdy též nazývaná jako tzv. specklegram) se osvětlí rovinnou vlnou. Ve Fourierově rovinně pak vznikají Youngovy proužky. Tyto proužky jsou mírou směru a velikostí posuvu pole koherenční zrnitosti. Směr a natočení Youngových proužků není náhodné, odpovídají normále ke směru pohybu pole koherenční zrnitosti. Dále je důležité, že vzdálenost jednotlivých proužků odpovídá nepřímo

úměrně velikosti posunutí struktury koherenční zrnitosti, respektive naší zkoumané veličině popisující deformaci předmětu. Je-li tedy vzdálenost mezi proužky malá, velikost posunutí je velká a naopak [1].

Fotografie na bázi koherenční zrnitosti si s rychlým vývojem techniky vysloužila modernizaci a časově náročnou fotografickou část nahradilo užití snímačů a počítačové zpracování obrazu.

1.2.2. Korelační metoda na bázi koherenční zrnitosti

Předchozí metoda je založena na vzniku proužků, díky kterým se vyhodnocuje deformace zkoumaného předmětu. Druhou významnou měřicí metodou je tzv. korelační metoda na bázi koherenční zrnitosti. Podstatou této metody je korelační analýza, která se provádí pomocí počítače. Při této metodě nepozorujeme a neanalyzujeme proužky, ale složitou strukturu koherenční zrnitosti v podobě světlých a tmavých skvrn. Podrobnější informace o korelační analýze nalezneme v kapitole 2.5.

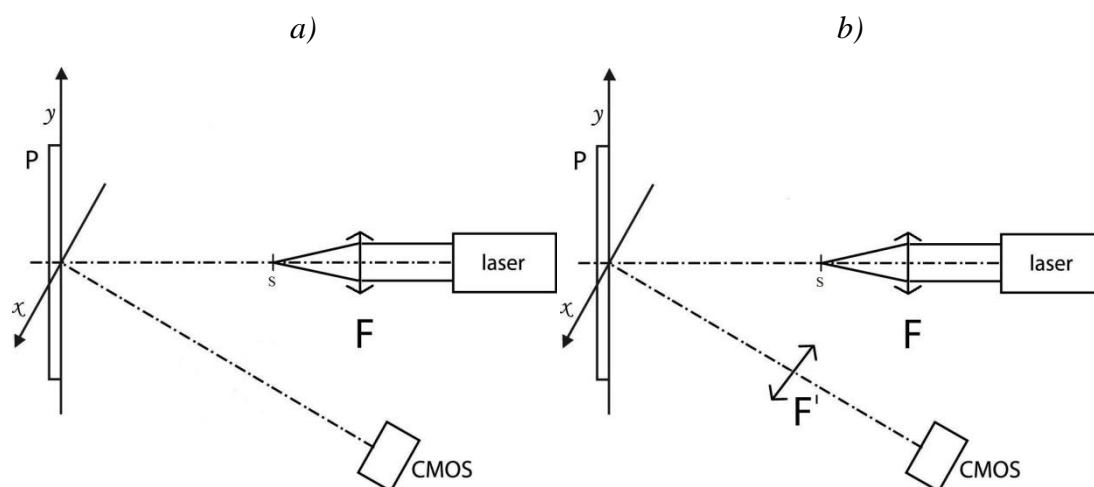
Strukturu koherenční zrnitosti zaznamenávají kamery. Lineární CCD a maticové CMOS detektory detekují záznam koherenční zrnitosti v základním a deformovaném stavu zkoumaného předmětu. Na obrazovce monitoru tak můžeme pozorovat reálnou strukturu koherenční zrnitosti a jí odpovídající intenzitní signály. Tyto intenzitní signály se v počítači vzájemně korelují. Posuv pole intenzitních struktur pak odpovídá pozici korelačního maxima mezi oběma signály. Tímto způsobem můžeme určit požadovanou veličinu popisující stav deformace předmětu. Díky technologickému pokroku lze strukturu koherenční zrnitosti generované předmětem odečítat v reálném čase na obrazovce monitoru. Metoda je proto velmi rychlá a poměrně snadná na vyhodnocení.

V experimentu, kterému je věnovaná tato práce, využijeme výše zmíněnou optoelektronickou metodu záznamu koherenční zrnitosti pomocí APS CMOS senzoru, který máme k dispozici v laboratoři. Výhodou těchto maticových CMOS kamer je možnost odečítání jednotlivých pixelů, respektive vybrané matice z celkového počtu pixelů, zvláště.

1.3. Popis experimentální sestavy

Náš experiment pro měření složky rotace ω_y předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti je uspořádán podle Obr. 2. pro volné a) a obrazové pole b) při použití následujících prvků. Jako zdroj koherentního záření použijeme v laboratoři He-Ne laser, jehož svazek pomocí osvětlovací čočky fokusujeme do bodu S (teorie předpokládá užití bodového zdroje) a odtud na zkoumaný předmět (hliníkový kvádr). Ten je umístěn na mechanickém rotačním stolečku, který zajišťuje rotaci s nejmenším krokem 0,5 úhlové minuty ($'$). K záznamu odražených koherentních světelných svazků je v poli koherenční zrnitosti umístěn detektor. V laboratoři užíváme CMOS kameru. V případě obrazového pole je mezi osvětlovaným předmětem a detektorem vložen optický systém. Součástí této experimentální sestavy je i osobní počítač, který slouží k řízení CMOS kamer, následného záznamu a zpracování výsledků. Geometrické uspořádání sestavy, stejně jako možný vložený optický systém, má významný vliv na vzhled a velikost koherenční zrnitosti.

V následujících podkapitolách si dále uvedeme základní informace k laseru, CMOS detektoru a rotačnímu stolečku, tedy k prvkům tvořícím hlavní stavební kameny našeho experimentu.



Obr. 2: Schéma pro měření rotace předmětu ve a) volném a b) obrazovém poli

1.3.1. He-Ne laser

Laser (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je dnes brán jako zdroj, generátor světla [4]. Světlo respektive elektromagnetické záření je vyzařováno ve formě úzkého svazku. V historii objevů laserům patří 60. léta 20. století. První funkční laser byl sestaven roku 1960 Američanem Theodorem H. Maimanem.

Laser se skládá z aktivního prostředí, rezonátoru a zdroje energie. Energie dodávaná ze zdroje vybudí v aktivním prostředí excitaci elektronů. To znamená přechod

ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu elektronů. Při následném sestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dochází k vyzaření kvanta energie, respektive emisi fotonů. Dochází tak k tzv. stimulované emisi fotonů, tedy vyzařování kvant energií se stejnou frekvencí a fází. Rezonátor, který obklopuje aktivní prostředí pak zajistí exponenciální zesílení stimulované emise. Výsledný koherentní a monochromatický svazek opouští laser polopropustným prostředím rezonátoru [4].

V laboratoři využíváme He-Ne laser s vlnovou délkou 632,8 nm (viz Příloha A).

1.3.2. CMOS kamera

Dalším, pro náš experiment, velmi důležitým prvkem experimentální sestavy je CMOS kamera. Ta zaznamenává pole koherenční zrnitosti, které následně převádí do počítače. V počítači pomocí již vytvořeného obslužného programu, můžeme zaznamenané pole struktury koherenční zrnitosti dále zpracovávat a upravovat.

Pro záznam obrazu jsou užívány tzv. maticové detektory. Jednotlivé fotony dopadají na základní element detektoru, či na několik těchto detektorů. Základní element detektoru se nazývá pixel, podle anglického picture element. Fotony jsou v tomto místě převáděny na elektrický náboj, který je v daném místě uchován a pomocí výstupního zesilovače převeden na obraz [4].

CMOS detektory pracují na principu aktivních pixelů, každý z těchto pixelů obsahuje vlastní zesilovač. V reálném čase tak můžeme odečítat jednotlivé hodnoty pixelů nebo jejich maticové uspořádání [4]. K popisu detektorů se používají různé parametry. Citlivost, spektrální citlivost nebo šum detektoru. Každý detektor je navíc charakterizován svým rozlišením.

V našem případě, užíváme maticový CMOS detektor s monochromatickým čipem ZORAN ZR 32112 MLC, který obsahuje 1288×1032 pixelů. Každý pixel má tvar čtverce o rozměrech $(7,5 \times 7,5) \mu m^2$.

1.3.3. Rotační stolek

Pro přesné nastavení malých rotací předmětu využijeme v našem experimentu mechanického rotačního stolečku. Osvětlovaný předmět je pevně ukotven na povrchu tohoto stolku. Zabráníme tak možným chybám, které by nastaly při nesprávné manipulaci. Už samotný fakt, že rotační stoleček je mechanický nám do měření zahrnuje případnou chybu lidského činitele. Tu budeme schopni částečně odstranit dostatečným počtem měření a získáním praxe při manipulaci s otočným šroubem.

Mechanický rotační stolek je popsán technickými parametry výrobce (viz Příloha B). Plošina rotačního stolku má tvar kruhu. Průměr plošiny je 200 mm, její nosnost je až 2,55 kg. Stolek je schopen rotovat celých 360°, nejmenší možná rotace stolku je půl

úhlové minuty. Výrobce udává tuto hodnotu s přesností na desetinu úhlové minuty. Samozřejmě musíme při manipulaci s otočným šroubem počítat i s tzv. mrtvým tahem. Proto vždy před měřením provedeme rotace na prázdno.

1.4. Určení nejistoty měření

V předchozí kapitole jsme si popsali experimentální sestavu, včetně jejích technických parametrů. Měříme-li v laboratoři, počítáme s faktem, že každý experiment je zatížen tzv. nejistotou měření. V metrologii to znamená určení kvality experimentálního měření z různých hledisek. Proto i v této bakalářské práci stanovíme citlivost a přesnost měření veličiny úhlu rotace ω_y pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti.

Základem určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota odchylovat od skutečné hodnoty. Tedy pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota [8, 9].

Standardní nejistoty měření se dělí do dvou typů A a B (případně ještě kombinace nejistot A i B). Tyto nejistoty měření se týkají přímo měřených veličin. Jako první máme standardní nejistotu typu A, respektive (u_A). Standardní nejistota typu A se určí pomocí opakovaných měření veličiny x , beze změny podmínek měření. Tuto nejistotu měření určíme dle vzorce

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3)$$

kde n je počet měření a \bar{x} je průměrná hodnota měřené veličiny x . Tato nejistota se postupným opakováním měření zmenšuje [8].

Druhá standardní nejistota typu B je odhadnuta bez opakování měření hledané veličiny x . Tuto nejistotu typu B stanovíme ze vzorce

$$u_B(x) = \frac{\Delta x}{\chi}, \quad (4)$$

kde Δx je polovina nejmenšího dílku stupnice použitého měřidla. Koeficient χ je daný typem rozdělení pravděpodobnosti, s jakou určíme na měřidle požadovanou hodnotu. V případě našeho experimentu využijeme tzv. rovnoměrné rozdělení $\chi = \sqrt{3}$ [9].

Nyní přejdeme k určení nejistoty měření nepřímo měřené veličiny $v = f(x, y, z, \dots)$, která je funkcí přímo měřených veličin x, y, z, \dots . Tuto nejistotu měření určíme pomocí tzv. zákona šíření nejistot a to v lineárním a odmocninovém tvaru. Pro lineární tvar zákona šíření nejistot obecně platí rovnice [8]

$$u(v) = \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| \cdot u_B(x) + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right| \cdot u_B(y) + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \cdot u_B(z), \quad (5)$$

kde $u(v)$ je výsledná nejistota měření veličiny v . Přímě měřené veličiny jsou x, y, z a $u_B(x), u_B(y), u_B(z)$ jsou dílčí nejistoty přímě měřených veličin.

Celková nejistota je tedy daná lineárním součtem dílčích nejistot. Tento způsob výpočtu užíváme v případě malého počtu proměnných. Jak ukážeme později, pro případ volného pole v našem experimentu stanovíme nejistotu měření hledané veličiny rotace ω_y právě dle zákona šíření nejistot v lineárním tvaru [9].

Určování nejistoty měření pomocí zákona šíření nejistot v odmocninovém tvaru, se užívá pro situaci většího počtu proměnných ($n \geq 4$). Vyhneme se tak zkreslenému předpokladu, který bychom dostali výpočtem totálního diferenciálu (5) pro větší počet proměnných. Obecně tedy platí pro veličinu v vztah [9]

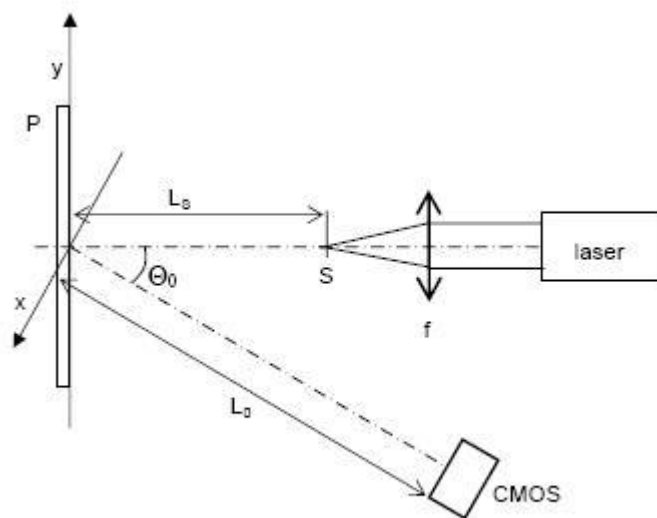
$$u(v) = \left(\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \cdot (u_B(x))^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \cdot (u_B(y))^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \cdot (u_B(z))^2 + \dots \right)^{1/2}, \quad (6)$$

kde stejně jako v předchozím případě je $v = f(x, y, z, \dots)$ výsledná funkce, x, y, z, \dots jsou přímě měřené veličiny a $u_B(x), u_B(y), u_B(z), \dots$ jsou dílčí nejistoty přímě měřených veličin. Tento způsob výpočtu nejistoty měření složky rotace ω_y aplikujeme v našem experimentu pro případ obrazového pole [9].

1.4.1. Nejistota měření složky rotace ω_y ve volném poli

V této podkapitole si popíšeme vhodné uspořádání experimentální sestavy pro měření složky rotace ω_y zkoumaného předmětu ve volném poli. Provedeme teoretický rozbor citlivosti měření, vypočteme rozlišení a nejistoty měření.

Experiment pro volné pole je uspořádán dle Obr. 3.



Obr. 3: Geometrické uspořádání pro měření rotace předmětu ve volném poli

Koherentní svazky He-Ne laseru dopadají kolmo na osvětlovaný předmět. Úhel směru osvětlení θ_s laserového záření se tedy po celou dobu experimentu nemění. Proto si již na začátku zjednodušíme vztahy pro výpočet úhlu rotace ω_y tuhého tělesa.

Obecně platí pro metodu korelace polí koherenční zrnitosti, v souladu s Obr. 3, vztah [1]

$$\omega_y = \frac{A_x}{L_0 \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \quad (7)$$

kde ω_y je hledaný úhel rotace, A_x je velikost posunutí pole koherenční zrnitosti ve směru souřadné osy x , L_0 značíme vzdálenost předmětu od snímače, θ_s popisuje úhel směru osvětlení a θ_0 značí úhel směru pozorování.

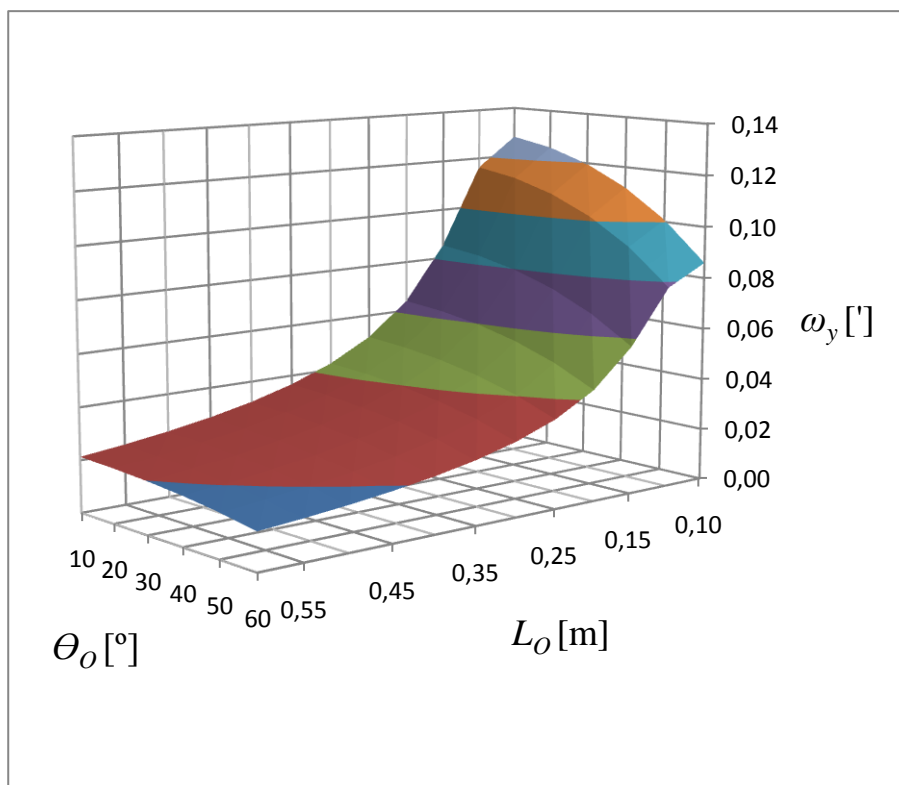
Uvažujeme-li již zmiňovaný předpoklad, kdy úhel směru osvětlení θ_s je po celou dobu experimentu 0° , tedy osvětlovací svazek je totožný se souřadnou osou z , dojde k úpravě vztahu pro výpočet úhlu rotace ω_y tuhého tělesa. Dosadíme-li do vzorce (7) za $\theta_s = 0^\circ$, respektive $\cos 0^\circ = 1$, dostaneme následující zjednodušený výraz

$$\omega_y = \frac{A_x}{L_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \quad (8)$$

Vztah (8) je výchozím vztahem pro naši následující analýzu.

Pro lepší názornost závislosti rozlišení měření složky rotace ω_y na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (viz Obr. 3), vytvoříme v tabulkovém editoru grafy. Pomocí tohoto grafického znázornění ukážeme teoretické rozlišení měření (Obr. 4), případně rozsah měření v různých případech geometrického uspořádání sestavy. Volíme přitom následující rozsahy geometrických parametrů sestavy: $\theta_0 = (10; 60)^\circ$,

$$L_0 = (0,1; 0,6)m.$$



Obr. 4: Rozlišení měření úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o $1px$

Z Obr. 4 je patrný teoretický rozsah rozlišení měření úhlu rotace $\omega_{y \min} \in (0,014; 0,128)'$. Při posuvu pole koherenční zrnitosti o $1px$ se dostaneme k rozlišení měření úhlu rotace až na setiny úhlové minuty. Nejmenší možné hodnoty rotace rozlišíme v případě geometrické sestavy $L_0 = 0,6m$ a $\theta_0 = 60^\circ$. Je tedy vidět, že rozlišovací schopnost metody roste s rostoucí vzdáleností L_0 předmětu od detektoru a rostoucím úhlem θ_0 směru pozorování. Setina úhlové minuty je velice malý úhel. Proto si vypočteme, s jakou nejistotou měření jsme schopni dosáhnout tak malého rozlišení.

V předchozí kapitole jsme uvedli obecný vzorec (5) pro výpočet nejistoty měření. Ten aplikujeme na naše proměnné následujícím způsobem

$$u(\omega_y) = \left| \frac{\partial \omega_y}{\partial A_x} \right| \cdot u_B(A_x) + \left| \frac{\partial \omega_y}{\partial \theta_0} \right| \cdot u_B(\theta_0) + \left| \frac{\partial \omega_y}{\partial L_0} \right| \cdot u_B(L_0). \quad (9)$$

Jednotlivé dílčí nejistoty přímo měřených veličin pak vypočítáme dle vztahu (3).

V experimentu využíváme CMOS kameru, kde nejmenší dílek stupnice detektoru odpovídá $1px$, ($1px = 7,5 \mu m$). Odtud tedy můžeme určit dílčí nejistotu

$$u_B(A_x) = \frac{\Delta A_x}{\chi} = \frac{0,5px}{\sqrt{3}} \approx 2,2 \mu m. \quad (10)$$

Podobným způsobem vypočteme i ostatní dílčí nejistoty geometrických parametrů. Nejmenší dílek stupnice úhlového měřidla je 1° . Proto platí

$$u_B(\theta_0) = \frac{\Delta\theta_0}{\chi} = \frac{0,5^\circ}{\sqrt{3}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ rad}. \quad (11)$$

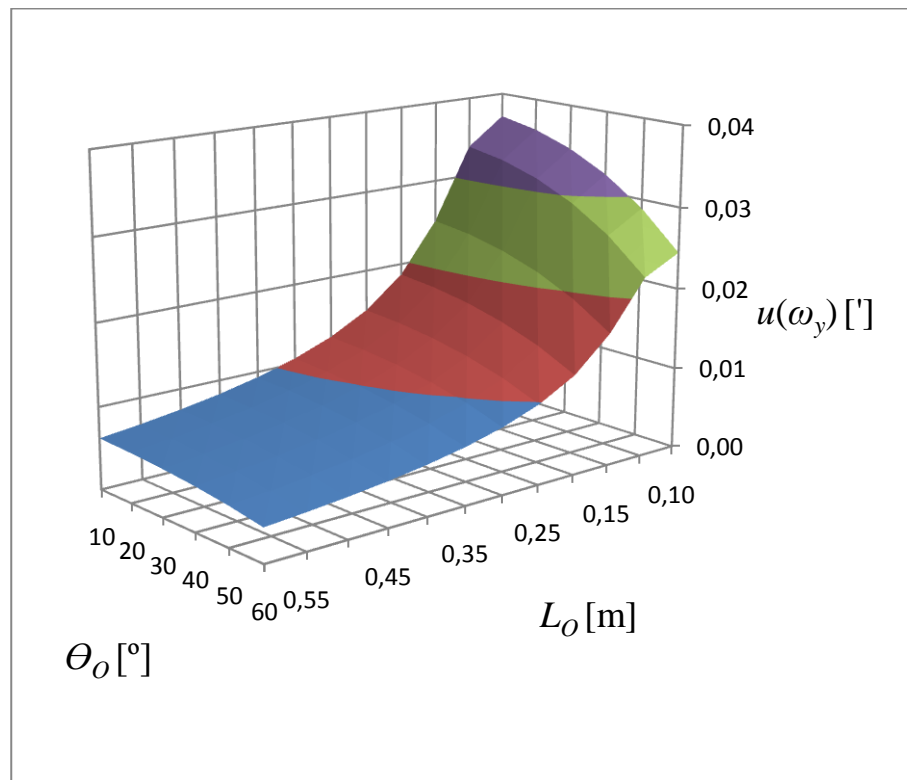
Nejmenší dílek stupnice délkového měřidla odpovídá 1 mm. Odtud tedy

$$u_B(L_0) = \frac{\Delta L_0}{\chi} = \frac{0,5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,3 \text{ mm}. \quad (12)$$

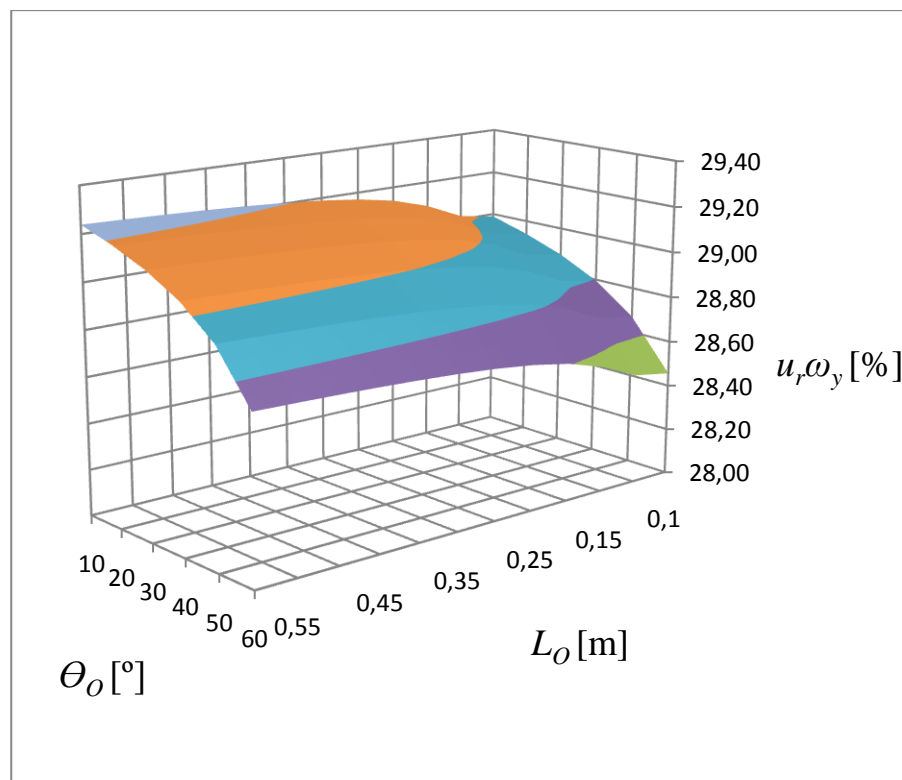
Následným výpočtem jednotlivých derivací ve vztahu (9) a po dosazení hodnot (10), (11) a (12) získáváme výslednou rovnici

$$u(\omega_y) = \left| \frac{1}{L_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right| \cdot u(A_x) + \left| - \frac{A_x \sin \theta_0}{L_0 (1 + \cos \theta_0)^2} \right| \cdot u(\theta_0) + \left| - \frac{A_x}{L_0^2 \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right| \cdot u(L_0). \quad (13)$$

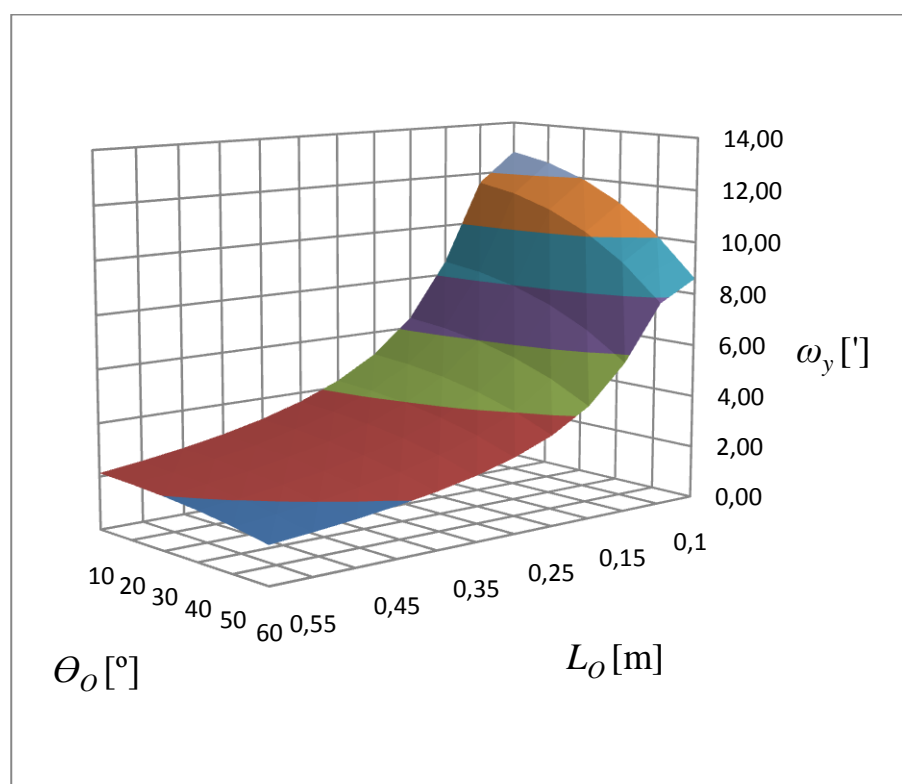
Vypočtenou nejistotu měření $u(\omega_y)$ složky rotace ω_y pak pro stejné rozsahy geometrických parametrů L_0 a θ_0 znázorníme graficky. Na Obr. 5 je jasně patrné s jakou nejistotou měření rotace předmětu musíme počítat, pokud se budeme pohybovat na hranici rozlišitelnosti měřicí metody. Tedy posuvu pole koherenční zrnitosti o 1px.



Obr. 5: Celková nejistota měření $u(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o 1px



Obr. 6: Relativní nejistota měření $u_r(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o $1px$

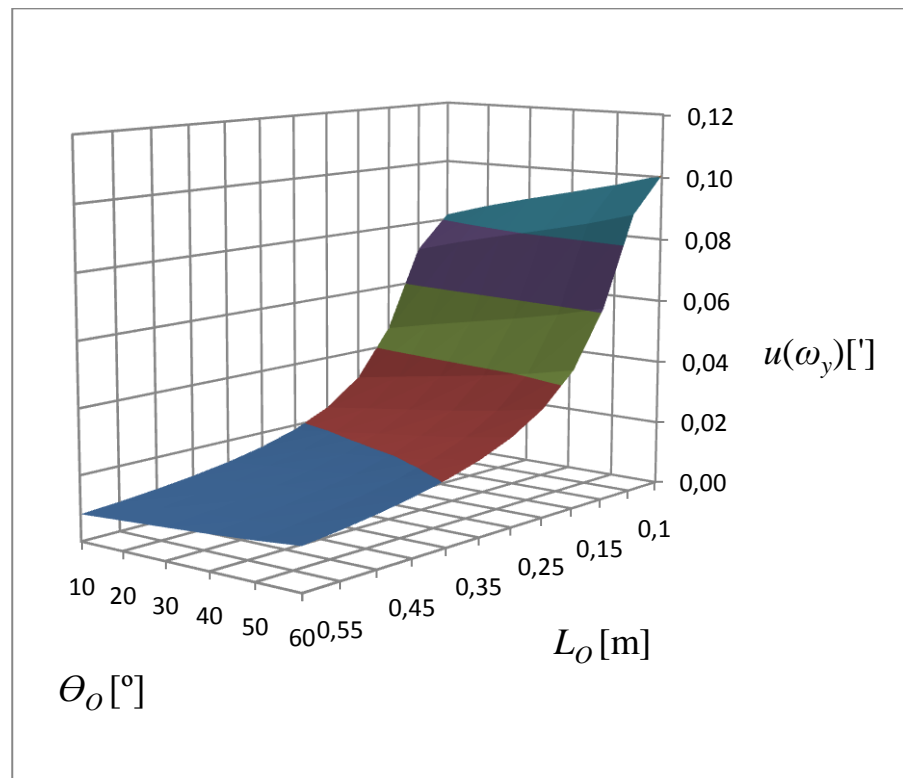


Obr. 7: Citlivost měření úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o $100px$

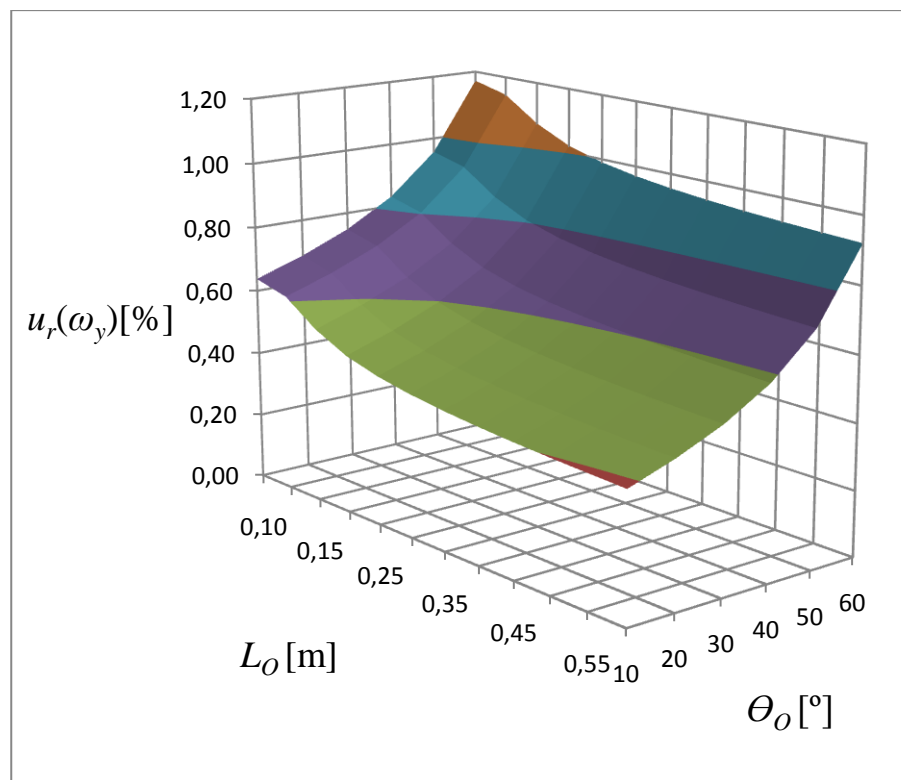
Na Obr. 6 je graf relativní nejistoty měření. Pro relativní nejistotu měření $u_r(\omega_y)$ složky rotace ω_y platí $u_r(\omega_y) = [u(\omega_y)/\omega_y] \cdot (100\%)$. Hodnoty relativní nejistoty měření úhlu rotace se pohybují okolo 29%. Což je pro experiment příliš vysoká hodnota. Proto stanovíme úhly rotace předmětu a následné nejistoty měření pro posuv pole koherenční zrnitosti o 100px a ověříme si, zda bude měření nabývat hodnot schůdné pro experimentální měření.

Podle rovnice (8) vypočteme možný teoretický rozsah citlivosti měřených rotací při posuvu pole koherenční zrnitosti o 100px. Úhly rotace tělesa zobrazené na Obr. 7 se při tomto posuvu pole pohybují od 2 do 12 minut. V této bakalářské práci se zaměřujeme na měření malých rotací předmětu, řádově jednotek úhlových minut. Pro zvolený posuv pole koherenční zrnitosti je proto interval od 2 do 12 úhlových minut ideální. Proto si ověříme, s jakou nejistotou můžeme tyto hodnoty měřit.

Postupujeme stejným způsobem jako při výpočtu nejistot měření při posuvu pole o 1px. Dosazením do rovnice (13) vypočteme celkovou $u(\omega_y)$ a relativní $u_r(\omega_y)$ nejistotu měření a vše znázorníme graficky. Na Obr. 8 a Obr. 9 tak můžeme pozorovat získané nejistoty měření. Docházíme k zajímavým výsledkům. Názorným příkladem může být vyjádření relativní nejistoty měření při posuvu pole koherenční zrnitosti o 100px, dostáváme se totiž až k nejistotám okolo 1%. Většinou se dokonce tyto hodnoty pohybují pod 1%. Ověřili jsme si tedy předpoklad, jak moc se zlepší relativní nejistota měření rotace předmětu při větším posuvu pole koherenční zrnitosti. Tyto výpočty budeme následovat při praktické realizaci v laboratoři.



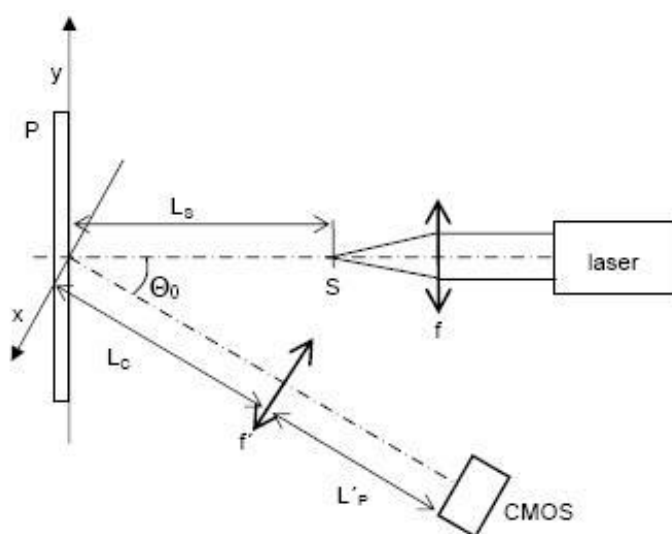
Obr. 8: Celková nejistota měření $u(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o 100px



Obr. 9: Relativní nejistota měření $u_r(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 3) při posuvu pole koherenční zrnitosti A_x o 100px

1.4.2. Nejistota měření složky rotace ω_y v obrazovém poli

V této podkapitole provedeme teoretický rozbor rozlišení, citlivosti a nejistoty měření složky rotace ω_y pro případ obrazového pole.



Obr. 10: Geometrické uspořádání experimentální sestavy pro měření rotace předmětu v obrazovém poli

Budeme přitom postupovat podobně jako v případě volného pole. Již dříve jsme si objasnili, že při měření v obrazovém poli musí být mezi zkoumaný předmět a detektor umístěn optický systém, například tenká čočka.

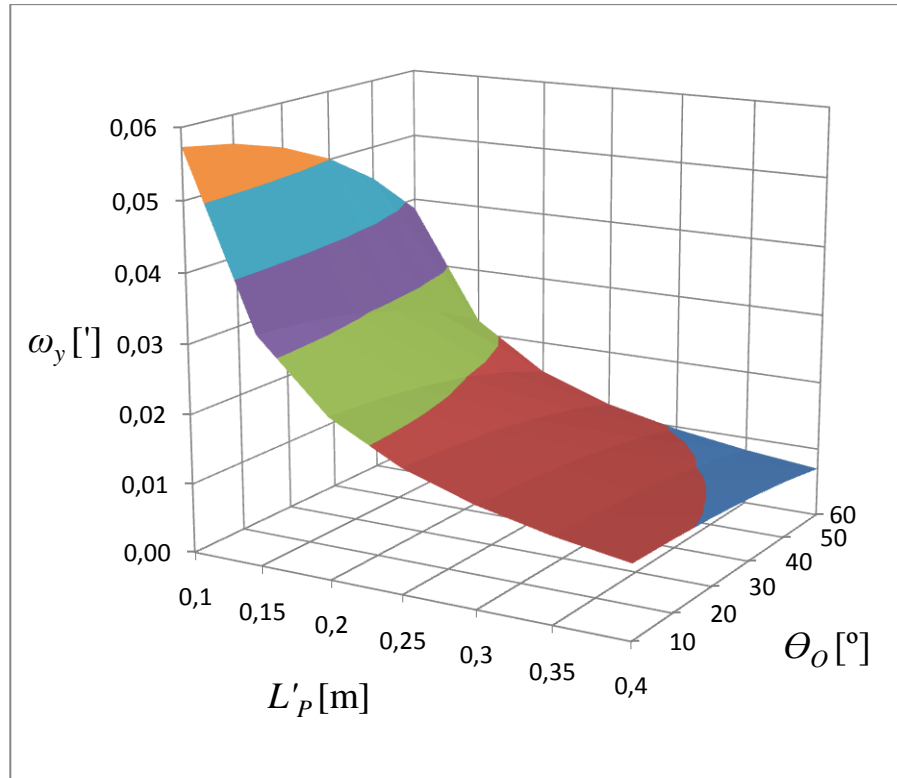
Experimentální sestava pro případ obrazového pole je ilustrována na Obr. 10. Opět použijeme jako zdroj koherentního záření He-Ne laser, který ozařuje koherentními světelnými svazky drsný povrch předmětu pod nulovým osvětlovacím úhlem θ_s . Úhel směru pozorování je označen θ_0 . Vzdálenost předmětu od detektoru je v tomto případě rozdělena na dvě části. L_C popisuje vzdálenost tenké čočky od předmětu, L'_p pak vzdálenost tenké čočky od detektoru. Všeobecně ale platí $L_C + L'_p = L_0$. Posledním, ale pro náš způsob pozorování velmi důležitým členem, je vložený optický systém. Intuitivně můžeme předpokládat funkci čočky vloženou mezi předmětem a detektorem. Při posuvu pole koherenční zrnitosti dojde pomocí vhodně zvolené ohniskové vzdálenosti čočky ke zvětšení posuvu pole před detektorem a následného citlivějšího rozlišení obecné deformace [1]. V našem případě tedy úhlu rotace předmětu.

Pro metodu korelace polí koherenční zrnitosti byl odvozen, v souladu s experimentálním uspořádáním dle Obr. 10, vztah [1]

$$\omega_y = \frac{A'_x f'}{L'_p - f' \left(L_C - \frac{L_p f'}{L_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)}, \quad (14)$$

kde veličina ω_y popisuje rotace zkoumaného předmětu okolo souřadné osy y , A'_x vyjadřuje velikost posunutí pole koherenční zrnitosti ve směru souřadné osy x roviny detekce a f' je ohnisková vzdálenost tenké (zobrazovací) čočky. Význam veličin θ_0 , L_C a L'_p jsme již uvedli výše.

Nyní graficky znázorníme rozsah rozlišení měření úhlů rotace ω_y při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o $1px$. Stejně jako v případě volného pole si stanovíme rozsah geometrických parametrů experimentální sestavy jako $L'_p = (0,1; 0,4)m$, $\theta_0 = (10; 60)^\circ$, $L_C = 0,11 m$. Dále také zvolíme $f' = 0,0254 m$. Z Obr. 11 můžeme vyčíst jakých hodnot úhel rotace ω_y nabývá, pokud se pohybujeme na teoretické hranici rozlišitelnosti metody. V tomto případě bychom se dostali do intervalu, který obsahuje dokonce tisíciny a setiny úhlové minuty. Konkrétně platí $\omega_{y \min} \in (0,007; 0,057)'$. Je zřejmé, že největší rozlišovací schopnost měření má uspořádání sestavy pro $L'_p = 0,4m$ a $\theta_0 = 60^\circ$. V případě obrazového pole tedy teoreticky dosahujeme přibližně o řád vyšší rozlišovací schopnosti měření než v případě volného pole. Dále si opět ověříme s jakou celkovou a relativní nejistotou měření složky rotace ω_y bychom byli schopni detekovat tak malé rotace předmětu.



Obr. 11: Rozlišení měření úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_c = 0,11$ cm, $f' = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o $1px$

Pro výpočet nejistoty měření $u(\omega_y)$ složky rotace ω_y v obrazovém poli použijeme obecný vzorec (6), který platí v případě zákona šíření nejistot v odmocninovém tvaru. Dosazením našich vstupních geometrických parametrů získáme tento předpis

$$u(\omega_y) = \left(\left(\frac{\partial \omega_y}{\partial A'_x} \right)^2 \cdot (u_B(A'_x))^2 + \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial L'_p} \right)^2 \cdot (u_B(L'_p))^2 + \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial L_c} \right)^2 \cdot (u_B(L_c))^2 + \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial f'} \right)^2 \cdot (u_B(f'))^2 + \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial \theta_0} \right)^2 \cdot (u_B(\theta_0))^2 \right)^{1/2} \quad (15)$$

Dílčí nejistoty měření $u_B(A'_x)$, $u_B(L'_p)$, $u_B(L_c)$, $u_B(f')$, $u_B(\theta_0)$ přímo měřených veličin A'_x , L'_p , L_c , f' , θ_0 odhadneme stejně jako v případě volného pole podle obecného vztahu (4).

Dílčí nejistotu měření $u_B(A'_x)$ veličiny A'_x vypočítáme analogicky dle (10). Nejmenší dílek stupnice detektoru je $1px$, ($1px = 7,5 \mu m$), proto

$$u_B(A'_x) = \frac{\Delta A'_x}{\chi} = \frac{0,5px}{\sqrt{3}} \approx 2,2 \mu m \quad (16)$$

Nejmenší dílek stupnice použitého délkového měřidla je opět $1mm$, proto dílčí nejistoty měření $u_B(L'_p)$ a $u_B(L_c)$ vzdáleností L'_p a L_c jsou rozměrově identické a odpovídají hodnotě

$$u_B(L'_p) = \frac{\Delta L'_p}{\chi} = \frac{0,5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,3 \text{ mm}, \quad (17)$$

$$u_B(L_c) = \frac{\Delta L_c}{\chi} = \frac{0,5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,3 \text{ mm}. \quad (18)$$

Dílčí nejistotu měření $u_B(f')$ ohniskové vzdálenosti tenké čočky f' stanovíme pomocí hodnot daných výrobcem. Ten udává přesnost měření ohniskové vzdálenosti na desetinu milimetru. Pak nejistotu určení ohniskové vzdálenosti odhadneme jako

$$u_B(f') = \frac{\Delta f'}{\chi} = \frac{0,05 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,03 \text{ mm}. \quad (19)$$

Poslední hodnotou, která je dosud neurčena zůstává dílčí nejistota $u_B(\theta_0)$ úhlu směru pozorování θ_0 . Ta je rovna rovnici (11) a její hodnota se pohybuje přibližně 10^{-3} rad .

V rovnici (15) vypočítáme jednotlivé derivace a upravíme ji následujícím způsobem

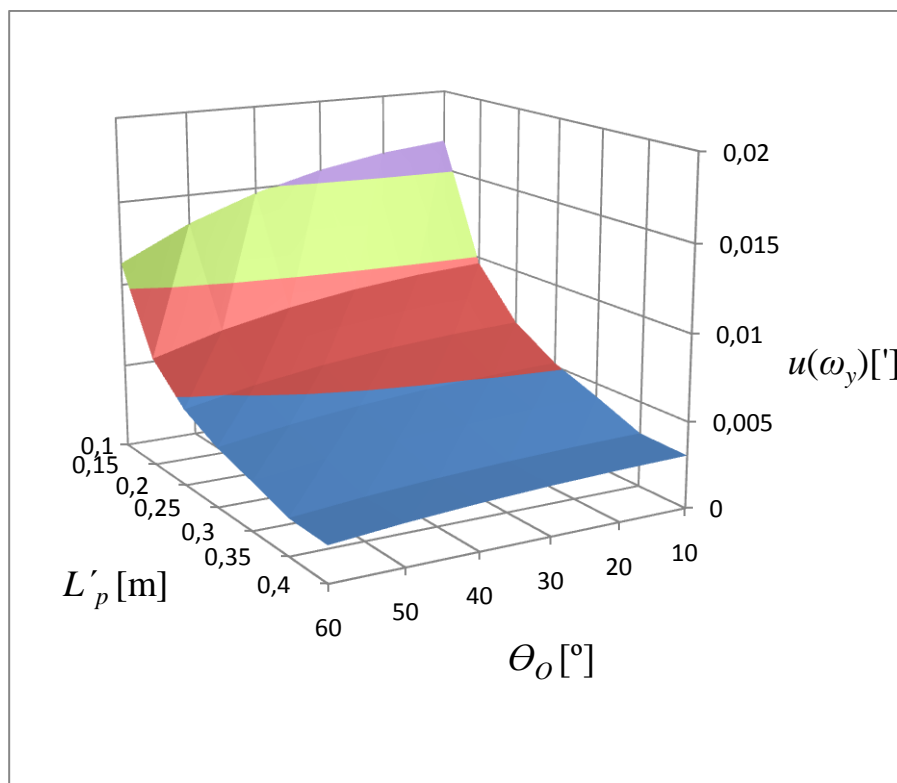
$$\begin{aligned} u(\omega_y) = & \left(\left(\frac{f'}{L'_p - f' \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right)^2 \cdot (u(A'_x))^2 + \left(- \frac{A'_x f'}{(L'_p - f')^2 \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} - \right. \right. \\ & \left. \frac{A'_x f' \left(-\frac{f'}{L'_p - f'} + \frac{L'_p f'}{(L'_p - f')^2} \right)}{(L'_p - f')^2 \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right)^2 \cdot (u(L'_p))^2 + \left(\frac{A'_x f'}{L'_p - f' \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right)^2 \cdot (u(L_c))^2 + \\ & \left(\frac{A'_x}{L'_p - f' \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} + \frac{A'_x f'}{(L'_p - f')^2 \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} - \right. \\ & \left. \frac{A'_x f' \left(-\frac{f'}{L'_p - f'} + \frac{L'_p f'}{(L'_p - f')^2} \right)}{(L'_p - f')^2 \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right)} \right)^2 \cdot (u(f'))^2 + \\ & \left. \left(- \frac{A'_x f' \sin \theta_0}{L'_p - f' \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + 1 \right) \cos \theta_0} \right)^2 \cdot (u(\theta_0))^2 \right)^{1/2}. \quad (20) \end{aligned}$$

Na Obr. 12 a 13 se pak můžeme přesvědčit, s jakými nejistotami měříme složku rotace ω_y při nejmenším možném posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o 1px . Relativní nejistota měření se pohybuje v intervalu lehce pod 30%. V praxi bychom takové měření

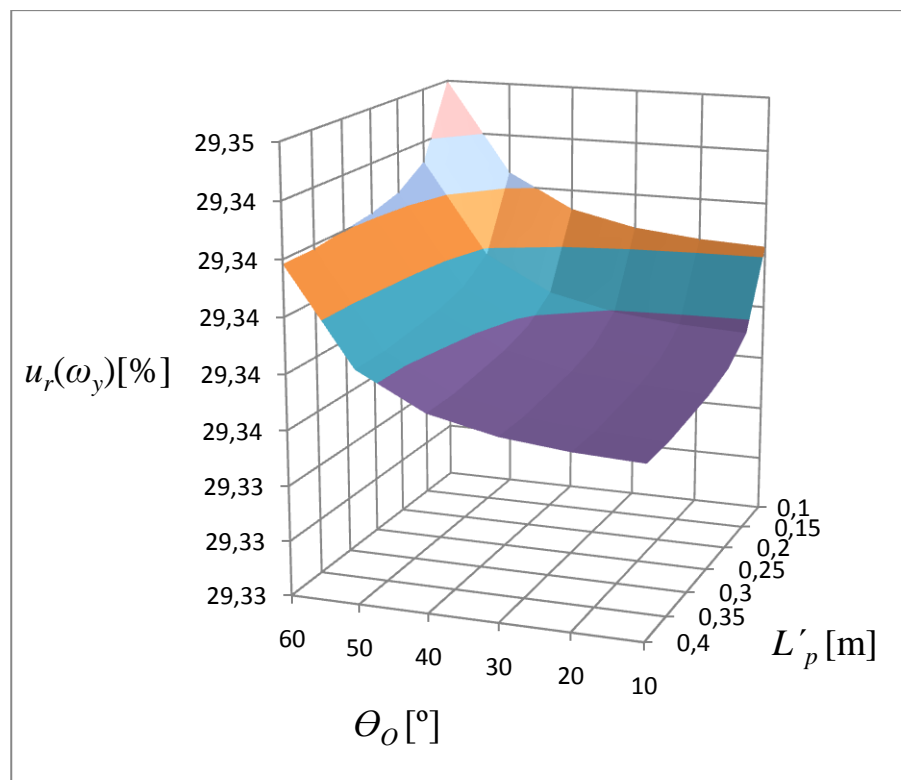
nijak nevyužili. Je tedy nutné zaměřit se na hledání ideálního posuvu pole koherenční zrnitosti s odpovídajícími malými nejistotami měření. V tabulkovém editoru tedy počítáme s různým geometrickým uspořádáním a posuvem pole.

Ideální hodnoty jsme získali při posuvu pole A'_x koherenční zrnitosti např. o $200px$. Citlivosti i nejistoty měření složky rotace ω_y zde vycházejí ideálně. Při tomto posuvu pole koherenční zrnitosti se dostáváme k detekci úhlu rotace ω_y řádově na úhlové minuty.

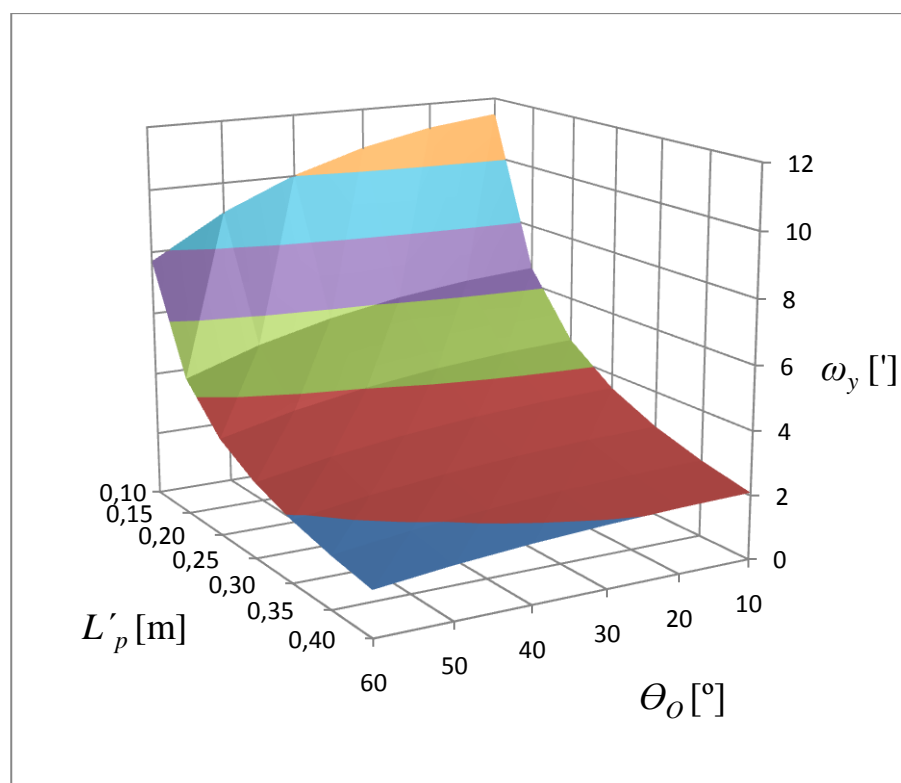
Z Obr. 14 můžeme odečíst teoretické hodnoty rotace ω_y , v rozsahu našich zvolených geometrických parametrů experimentální sestavy, které se pohybují v intervalu od 2 do 12 úhlových minut při posuvu pole $A'_x = 200px$. A přitom se stále držíme předpokladu malých rotací předmětu. Měření, pomocí kterého jsme schopni rozlišit rotaci ω_y 2 úhlové minuty s relativní chybou měření $u_r(\omega_y)$ pod 1%, můžeme považovat za velmi přesné. Nejistoty měření $u(\omega_y)$, $u_r(\omega_y)$ rotace ω_y při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o $200px$ popisují Obr. 15 a 16. Tyto teoretické výpočty pak ověříme v laboratoři.



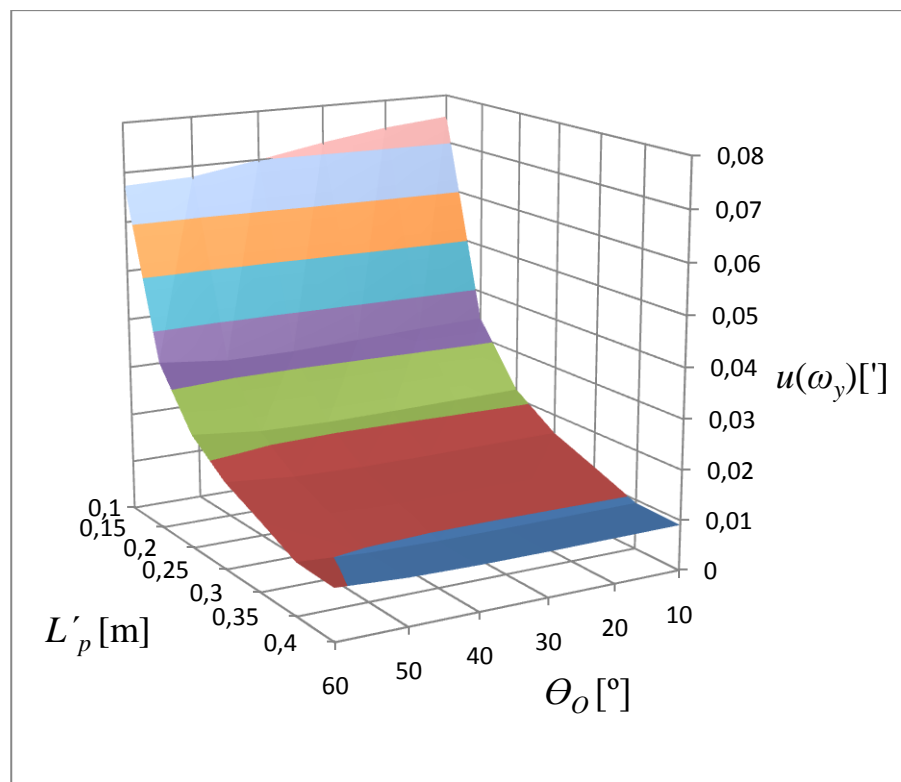
Obr. 12: Celková nejistota měření $u(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_C = 0,11$ cm, $f = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o $1px$



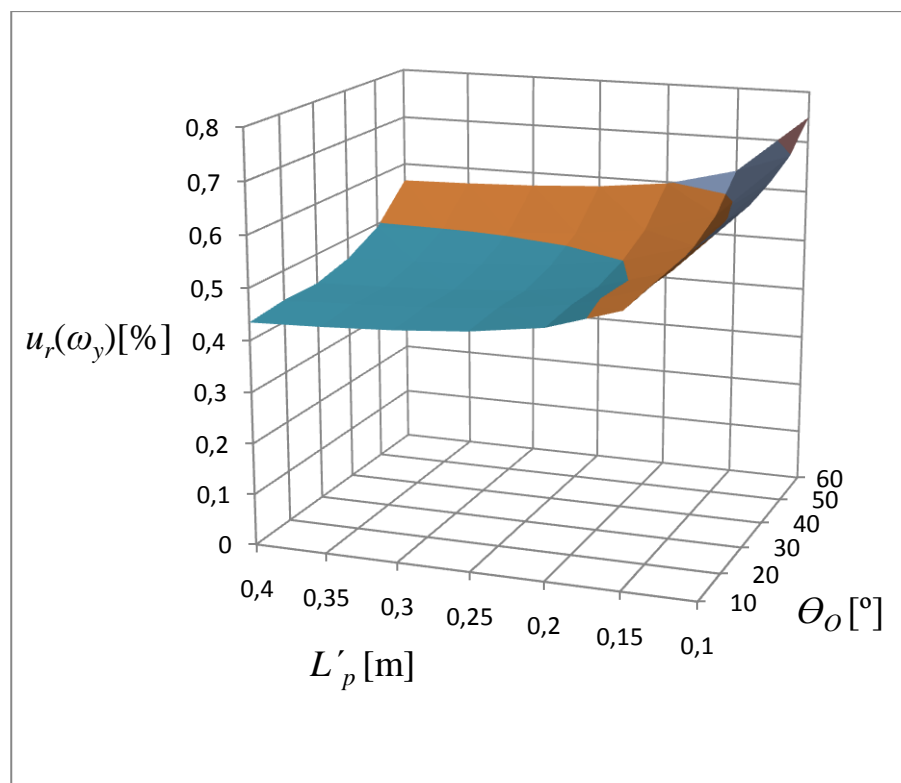
Obr. 13: Relativní nejistota měření $u_r(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_C = 0,11$ cm, $f' = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o 1px



Obr. 14: Citlivost měření úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_C = 0,11$ cm, $f' = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o 200px



Obr. 15: Celková nejistota měření $u(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_C = 0,11$ cm, $f' = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o 200px



Obr. 16: Relativní nejistota měření $u_r(\omega_y)$ úhlu rotace ω_y předmětu v závislosti na geometrickém uspořádání experimentální sestavy (dle Obr. 10, $L_C = 0,11$ cm, $f' = 0,0254$ m) při posuvu pole koherenční zrnitosti A'_x o 200px

1.5. Korelační analýza

Vyhodnocení korelační měřicí metody se provádí pomocí tzv. korelační analýzy. Posuv pole koherenční zrnitosti je stanoven statisticky využitím normované jednodimenzionální funkce vzájemné korelace intenzit zaznamenaných polí koherenční zrnitosti před a po deformaci předmětu [1]. Konkrétně, posuv pole koherenční zrnitosti kvantitativně popisujeme pomocí pozice maxima této statistické funkce. Intenzity jsou přitom zaznamenány užitím maticového snímače v rovině detekce.

Matematicky odpovídá normovaná funkce vzájemné korelace tvaru

$$r_{1,2}(\Delta q) = \frac{\langle I_1(q)I_2(q+\Delta q) \rangle - \langle I_1(q) \rangle \langle I_2(q) \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2(q) \rangle - \langle I_1(q) \rangle^2} \sqrt{\langle I_2^2(q) \rangle - \langle I_2(q) \rangle^2}}, \quad (21)$$

kde $I_1(q)$ a $I_2(q + \Delta q)$ jsou právě intenzity zaznamenané detektorem před a po deformaci předmětu. V případě našeho experimentu platí, že koeficient $\Delta q \cong A_x$, a tedy Δq odpovídá hledanému posuvu pole koherenční zrnitosti.

Stanovený posuv struktury koherenční zrnitosti slouží k určení složek tenzoru malé deformace na povrchu předmětu. V našem konkrétním experimentu jde o úhel rotace ω_y předmětu. Funkce vzájemné korelace $r_{1,2}$ má maximum v pozici nula, pokud nedochází ke změně polohy (deformaci) předmětu, jinak řečeno, je-li předmět v klidu. Proto při nenulové změně předmětu je nenulová i poloha maxima funkce vzájemné korelace. V případě, že nedošlo k deformaci předmětu, odpovídá maximum funkce jedničce, protože funkce je normovaná. Poloha maxima funkce je tedy mírou hledané změny polohy předmětu. V případě, že dojde k poklesu maxima funkce vzájemné korelace, mluvíme o tzv. dekorelaci. Celková struktura koherenční zrnitosti se následkem deformace předmětu vždy alespoň nepatrně změní. Podobnost, kterou hledáme při posuvu pole koherenční zrnitosti mezi intenzitními signály před a po deformaci předmětu tedy v případě velkých změn na povrchu předmětu nenajdeme.

V laboratoři detektorem zaznamenanou strukturu koherenční zrnitosti při našem experimentu zpracovává počítač s již vytvořeným programem pro korelační analýzu. To nám umožňuje rychlou manipulaci a vyhodnocení výsledků měřicí metody.

2. Realizace experimentu

Ve své bakalářské práci se zaměřuji na srovnání detekce složky rotace ω_y předmětu při měření ve volném a obrazovém poli. V předchozích kapitolách jsme si rozebrali dopodrobna teorii experimentu, určili jsme teoretické citlivosti a rozlišení měření složky rotace ω_y při různém geometrickém uspořádání experimentální sestavy. Cílem této kapitoly je popsat průběh experimentu a přepočítat získaná data. Kapitola je rozdělena na dvě části, které odpovídají dvěma experimentálním měřením a to ve volném a obrazovém poli.

V laboratoři zvolíme optimální experimentální sestavu s parametry, které jsou uvedeny v tabulkách u příslušných podkapitol. Uspořádání experimentální sestavy navrhne na základě našich provedených výpočtů při analýze citlivosti a přesnosti měření a také zkušeností. Samozřejmě rovněž zvažujeme takové hodnoty geometrických parametrů sestavy, aby odpovídaly možnostem laboratoře. Dále jsme omezeni např. geometrickými předpoklady rotačního stolku, který neumožňuje větší přiblížení zobrazovací čočky než na hodnotu $L_C = 11 \text{ cm}$. Aby vše pracovalo v souladu a měření nabývalo námi požadované hodnoty, je nutné věnovat experimentu pečlivou přípravu.

Samotné měření probíhá poměrně rychle. Popíšme si nyní základní kroky v experimentu. Laserové záření je pomocí fokusační čočky a zrcátka nasměrováno kolmo na zkoumaný předmět. Mechanickým otáčením rotačního stolečku o příslušné úhlové minuty rotujeme zkoumaný předmět (hliníkový kvádr) okolo souřadné osy y , současně tedy dochází k pohybu pole koherenční zrnitosti. Při měření v laboratoři je nutné využít dvou osob, neboť rotační stoleček je mechanický a nemůžeme jej řídit elektronicky. Proto první osoba otáčí rotačním stolečkem se zkoumaným předmětem o daný úhel, následně pak druhá osoba zaznamená odpovídající posuv pole koherenční zrnitosti na snímači a odtud se data pomocí obslužného programu převedou do počítače. Vše se periodicky opakuje. Je důležité, aby byl vždy proveden záznam pole koherenční zrnitosti před a po rotaci předmětu. Při měření jsme rotovali předmětem o úhly v rozmezí od $0,5'$ do $7,5'$ a každé měření jsme desetkrát opakovali.

Výsledky měření uvedeme v příslušných tabulkách (viz podkapitola 2.1. a 2.2.). Vyhodnocení jednotlivých výsledků měření pak provedeme v následující kapitole 3.

2.1. Měření rotace ω_y předmětu ve volném poli

Naše první experimentální měření rotace ω_y předmětu probíhalo pro tzv. volné pole. Zvolené parametry experimentální sestavy jsou uvedeny v Tab. 1.

Připomeňme si význam jednotlivých veličin: veličina f popisuje ohniskovou vzdálenost osvětlovací čočky, θ_S značí úhel směru osvětlení, θ_O úhel směru pozorování. L_O označuje vzdálenost předmětu od detektoru.

Veličina	Velikost	Jednotka
f	10	[cm]
θ_s	0	[°]
θ_0	22,5	[°]
L_0	50	[cm]

Tab. 1: Parametry experimentální sestavy pro volné pole

Výsledky měření jsou prezentovány v následujících tabulkách (Tab. 2 – Tab. 6). Každá z nich obsahuje detekovaný posuv pole A_x koherenční zrnitosti, veličinu $r_{1,2}$ jako normovanou funkci vzájemné korelace intenzit, měřený úhel rotace předmětu ω_y , odchylku měření $\Delta\omega_y$ a kvadrát této odchylky $(\Delta\omega_y)^2$. Součástí každé tabulky jsou také jednotky příslušných veličin. V posledním řádku tabulky je uvedena průměrná hodnota změřené rotace ω_y předmětu a průměrná hodnota vzájemné korelace.

Měření	A_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(')²]
1	-22	98,2	0,54	0,04	0,0016
2	-22	96,8	0,54	0,04	0,0016
3	-20	98,8	0,50	0,00	0,0000
4	-19	98,8	0,47	-0,03	0,0009
5	-19	98,7	0,47	-0,03	0,0009
6	-21	98,6	0,52	0,02	0,0004
7	-20	98,2	0,50	0,00	0,0000
8	-21	98,5	0,52	0,02	0,0004
9	-19	98,5	0,47	-0,03	0,0009
10	-19	97,8	0,47	-0,03	0,0009
		98,29	0,50		

Tab. 2: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 0,5'

Měření	A_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(')²]
1	-37	98,1	0,92	-0,04	0,0016
2	-42	98,1	1,04	0,09	0,0081
3	-38	95,9	0,94	-0,01	0,0001
4	-38	97,5	0,94	-0,01	0,0001
5	-38	98,9	0,94	-0,01	0,0001
6	-40	98,9	0,99	0,04	0,0016
7	-37	98,7	0,92	-0,04	0,0016
8	-37	99	0,92	-0,04	0,0016
9	-39	98,7	0,97	0,01	0,0001
10	-39	98,5	0,97	0,01	0,0001
		98,23	0,95		

Tab. 3: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 1'

Měření	A_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	-98	97,2	2,43	-0,06	0,0036
2	-100	96,9	2,48	-0,01	0,0001
3	-99	97	2,45	-0,04	0,0016
4	-98	95,3	2,43	-0,06	0,0036
5	-100	94,7	2,48	-0,01	0,0001
6	-104	95,3	2,58	0,08	0,0064
7	-101	94,5	2,50	0,01	0,0001
8	-106	94,7	2,62	0,13	0,0169
9	-98	96,5	2,43	-0,06	0,0036
10	-102	93,3	2,53	0,03	0,0009
		95,54	2,49		

Tab. 4: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 2,5'

Měření	A_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	-197	84,4	4,88	-0,06	0,0036
2	-202	84,9	5,00	0,06	0,0036
3	-192	93,6	4,75	-0,19	0,0361
4	-201	91,5	4,98	0,04	0,0016
5	-203	90,4	5,03	0,09	0,0081
6	-207	91,3	5,13	0,19	0,0361
7	-201	91,4	4,98	0,04	0,0016
8	-195	89,4	4,83	-0,11	0,0121
9	-199	86,7	4,93	-0,01	0,0001
10	-198	90,8	4,90	-0,04	0,0016
		89,44	4,94		

Tab. 5: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 5'

Měření	A_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	-297	70,7	7,35	0,00	0,0000
2	-297	82,2	7,35	0,00	0,0000
3	-299	70,7	7,40	0,05	0,0025
4	-292	80,3	7,23	-0,12	0,0144
5	-294	82,6	7,28	-0,07	0,0049
6	-297	80,8	7,35	0,00	0,0000
7	-297	76,5	7,35	0,00	0,0000
8	-297	75,7	7,35	0,00	0,0000
9	-301	74,6	7,45	0,10	0,0100
10	-298	86,9	7,38	0,03	0,0009
		78,1	7,35		

Tab. 6: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 7,5'

2.2. Měření rotace ω_y předmětu v obrazovém poli

Naše druhé experimentální měření rotace ω_y předmětu tentokrát pro případ obrazového pole má geometrické parametry experimentální sestavy uvedeny v Tab. 7. Opět se setkáváme s veličinou f , která popisuje ohniskovou vzdálenost osvětlovací čočky, θ_S je úhel směru osvětlení a θ_O je úhel směru zobrazení. V obrazovém poli máme navíc tyto veličiny L_C a L'_P jako vzdálenosti čočky od předmětu a detektoru a f' je ohnisková vzdálenost zobrazovací čočky.

Detailní fotografie experimentální sestavy pro případ obrazového pole je uveden v Příloze C.

Veličina	Velikost	Jednotka
f	10	[cm]
θ_S	0	[°]
θ_O	22,5	[°]
L_C	11	[cm]
L'_P	39	[cm]
f'	2,54	[cm]

Tab. 7: Parametry experimentální sestavy pro obrazové pole

Následující tabulky (Tab. 8 – Tab. 11) prezentují dosažené výsledky měření. Veličina A'_x popisuje detekovaný posuv pole koherenční zrnitosti, $r_{1,2}$ je normovanou funkcí vzájemné korelace intenzit a ω_y značí změřený úhel rotace předmětu. Poslední dva sloupce obsahují odchylku měření $\Delta\omega_y$ a kvadrát této odchylky $(\Delta\omega_y)^2$.

Měření	A'_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(')²]
1	44	95,3	0,46	-0,04	0,0016
2	44	94,7	0,46	-0,04	0,0016
3	55	94,2	0,57	0,07	0,0049
4	46	93,7	0,48	-0,02	0,0004
5	53	96,5	0,55	0,05	0,0025
6	56	92,5	0,58	0,08	0,0064
7	43	96	0,45	-0,05	0,0025
8	45	96,7	0,47	-0,03	0,0009
9	51	96,5	0,53	0,03	0,0009
10	42	96,9	0,44	-0,06	0,0036
		95,3	0,50		

Tab. 8: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 0,5'

Měření	A'_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	95	93,6	0,99	-0,01	0,0001
2	95	96,1	0,99	-0,01	0,0001
3	101	91	1,05	0,05	0,0025
4	94	94	0,98	-0,02	0,0004
5	95	95,1	0,99	-0,01	0,0001
6	98	95	1,02	0,02	0,0004
7	100	96,3	1,04	0,04	0,0016
8	93	94	0,97	-0,03	0,0009
9	91	95,1	0,95	-0,05	0,0025
10	98	93,9	1,02	0,02	0,0004
		94,41	1,00		

Tab. 9: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 1'

Měření	A'_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	247	73,6	2,57	0,10	0,0100
2	243	90	2,53	0,06	0,0036
3	241	93,2	2,51	0,03	0,0009
4	230	94,6	2,40	-0,08	0,0064
5	250	94,6	2,60	0,13	0,0169
6	232	94,4	2,42	-0,06	0,0036
7	240	83,6	2,50	0,02	0,0004
8	231	90,8	2,41	-0,07	0,0049
9	232	87,9	2,42	-0,06	0,0036
10	231	82,7	2,41	-0,07	0,0049
		88,54	2,48		

Tab. 10: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 2,5'

Měření	A'_x [px]	$r_{1,2}$ [%]	ω_y [']	$\Delta\omega_y$ [']	$(\Delta\omega_y)^2$ [(') ²]
1	469	93,2	4,88	-0,07	0,0049
2	475	90,7	4,95	-0,01	0,0001
3	460	85,5	4,79	-0,16	0,0256
4	493	80,9	5,13	0,18	0,0324
5	475	74,6	4,95	-0,01	0,0001
6	502	91	5,23	0,28	0,0784
7	488	84,7	5,08	0,13	0,0169
8	463	79,4	4,82	-0,13	0,0169
9	464	87,2	4,83	-0,12	0,0144
10	466	87,1	4,85	-0,10	0,0100
		85,43	4,95		

Tab. 11: Měření úhlu rotace ω_y předmětu o 5'

3. Vyhodnocení experimentu

V této závěrečné kapitole si vyhodnotíme výsledky našeho laboratorního experimentu pro měření rotace ω_y zkoumaného předmětu. Určíme, jaká je přesnost a opakovatelnost dosažených výsledků měření a následným srovnáním těchto výsledků pro volné a obrazové pole dojdeme k cílenému závěru experimentu a zároveň celé bakalářské práce.

Kompletní výsledky měření pro volné a obrazové pole při rotaci ω_y předmětu v rozmezí od 0,5' do 7,5' jsou přehledně shrnuty v Tab. 12 až 16. V prvním řádku každé tabulky je vždy uvedena výsledná naměřená hodnota úhlu rotace ω_y , následuje průměrná hodnota normované funkce vzájemné korelace $\bar{r}_{1,2}$ a průměrná hodnota \bar{A}_x detekovaného posuvu pole koherenční zrnitosti a dále směrodatná odchylka průměru měření $\sigma\bar{\omega}_y$ a směrodatná odchylka jednoho měření $\sigma\omega_y$. Znovu si připomeňme, že každé měření bylo vždy provedeno 10 krát.

	Volné pole	Obrazové pole
ω_y [']	$0,50 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$
$\bar{r}_{1,2}$ [%]	98,29	95,30
\bar{A}_x [px]	20	48
$\sigma\bar{\omega}_y$ [']	0,01	0,02
$\sigma\omega_y$ [']	0,03	0,06

Tab. 12: *Výsledky měření při rotaci předmětu o 0,5'*

	Volné pole	Obrazové pole
ω_y [']	$0,95 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
$\bar{r}_{1,2}$ [%]	98,23	94,41
\bar{A}_x [px]	39	96
$\sigma\bar{\omega}_y$ [']	0,01	0,01
$\sigma\omega_y$ [']	0,04	0,03

Tab. 13: *Výsledky měření při rotaci předmětu o 1'*

	Volné pole	Obrazové pole
ω_y [']	$2,49 \pm 0,02$	$2,48 \pm 0,02$
$\bar{r}_{1,2}$ [%]	95,54	88,54
\bar{A}_x [px]	101	238
$\sigma\bar{\omega}_y$ [']	0,02	0,02
$\sigma\omega_y$ [']	0,07	0,08

Tab. 14: *Výsledky měření při rotaci předmětu o 2,5'*

	Volné pole	Obrazové pole
ω_y [']	$4,94 \pm 0,03$	$4,95 \pm 0,05$
$\bar{r}_{1,2}$ [%]	89,44	85,43
\bar{A}_x [px]	200	476
$\sigma\bar{\omega}_y$ [']	0,03	0,05
$\sigma\omega_y$ [']	0,11	0,15

Tab. 15: *Výsledky měření při rotaci předmětu o 5'*

	Volné pole	Obrazové pole
ω_y [']	$7,35 \pm 0,02$	-
$\bar{r}_{1,2}$ [%]	78,1	-
\bar{A}_x [px]	297	-
$\sigma\bar{\omega}_y$ [']	0,02	-
$\sigma\omega_y$ [']	0,06	-

Tab. 16: *Výsledky měření při rotaci předmětu o 7,5'*

Tabulka 12 popisuje první sérii měření, kde docházelo k rotaci ω_y předmětu o půl úhlové minuty. Jak pro volné i obrazové pole jsme naměřili velice přesné výsledky. Opakovatelnost jednoho měření úhlu rotace jsme určili s přesností 0,03' při měření ve volném poli a 0,06' v obrazovém poli. V případě volného pole se průměrná hodnota maxima normované korelační funkce pohybovala na 98%, v obrazovém poli jsme se s korelační funkcí dostali na 95%. Hodnoty korelační funkce jsou velmi vysoké. To znamená, že při takto malých rotacích předmětu nedochází k velkým změnám v poli koherenční zrnitosti, a tedy k dekorelaci. Ve volném poli odpovídá naměřené rotaci předmětu detekovaný průměrný posuv A_x pole koherenční zrnitosti v průměru 20px,

v obrazovém poli se dostáváme k průměrné hodnotě $48px$. Posuv pole koherenční zrnitosti v obrazovém poli je přibližně dvojnásobný.

Při dalším měření jsme rotovali předmětem o $1'$. Výsledky měření pro volné a obrazové pole jsme srovnali v Tab. 13. Opět jsme naměřili velice přesné výsledky. Pro obrazové pole jsme se dokonce dostali na požadovanou $1'$. Korelační funkce se pohybovala ve volném poli i obrazovém poli vysoko nad 90%. Směrodatné odchylky průměru a směrodatné odchylky jednoho měření byly velmi nízké. Takže míra variability měření rotace je při opakovaných měření velmi nízká. Dokonce se pohybuje na setinách úhlové minuty. Při tomto měření kamera zaznamenala průměrný posuv pole koherenční zrnitosti $39px$ pro volné pole a $96px$ pro obrazové pole.

Třetí série měření popisuje rotaci zkoumaného předmětu o $2,5'$. Výsledky jsou přehledně uvedeny v Tab. 14. Rotaci $2,5'$ jsme i v tomto případě naměřili s vysokou přesností. Směrodatné odchylky opakovaných měření se pohybují opět na setinách úhlové minuty. Opakovatelnost měření je tak pořád velice schůdná pro experimentální měření. Při tomto měření však již pozorujeme pokles průměrné hodnoty korelační funkce. Ve volném poli se korelační funkce ještě drží nad 90%, avšak v případě obrazového pole dochází k poklesu a korelační funkce nabývá 88%. Detekovaný posuv pole koherenční zrnitosti se v průměru pohybuje na hodnotě $101px$ pro volné pole a pro obrazové pole zaznamenáme posuv pole koherenční zrnitosti $238px$.

Rotace předmětu o $5'$ byla předmětem čtvrté série měření. Výsledky tohoto experimentálního měření jsou uvedeny v Tab. 15. Pro volné a obrazové pole vychází měření opět přesně. Avšak například směrodatná odchylka jednoho měření se zvýšila na desetinu úhlové minuty. Korelace už v obou případech, tedy jak pro obrazové, tak pro volné pole poklesla pod 90%, což je dobře vysvětlitelné, neboť především v obrazovém poli je již detekovaný posuv pole koherenční zrnitosti před a po rotaci předmětu vysoký ($200px$ pro volné pole a $476px$ pro obrazové pole).

Při poslední sérii měření jsme rotovali zkoumaným předmětem o $7,5'$. Na základě předchozích výsledků, kdy korelační funkce v obrazovém poli klesala k 85%, jsme rotaci předmětu o $7,5'$ měřili jen pro volné pole. V obrazovém poli by již došlo k výrazné dekorelaci intenzitních signálů a požadovaná informace by se ztratila v šumu. Vraťme se ale k posuvu pole koherenční zrnitosti v případě volného pole. Průměrná hodnota \bar{A}_x je $297px$. Přesnost i směrodatné odchylky jsou stále optimální, korelační funkce v tomto případě klesla k 78%. Pohybujeme se na hranici funkčnosti měřicí metody.

Shrneme-li dosažené výsledky našich měření, můžeme konstatovat, že metoda korelace polí koherenční zrnitosti pro měření rotace ω_y předmětu okolo souřadné osy y ve volném a obrazovém poli je správným nástrojem pro měření velmi malých úhlů v rozmezí desetin až jednotek úhlových minut. Je také zřejmé, že v případě obrazového pole odpovídá měření rotace vždy větší posuv pole koherenční zrnitosti než v případě volného pole a to tedy znamená, že měření v obrazovém poli má vyšší rozlišovací schopnost měření. Proto je vhodné pro měření velmi malých úhlů (řádově desetiny, případně setiny úhlové minuty) volit uspořádání v obrazovém poli a pro měření úhlů v řádech jednotek úhlových minut, volit uspořádání ve volném poli.

Závěr

Prezentovaná bakalářská práce je zaměřena na měření rotace zkoumaného předmětu v opticky volném a obrazovém poli metodou korelace polí koherenční zrnitosti. Cílem bakalářské práce je realizovat experiment, respektive provést všechny části experimentu, tj. přípravu, realizaci a vyhodnocení experimentu.

V úvodu jsme se seznámili s moderní bezkontaktní měřicí metodou. Nahlédli jsme až k základním principům koherenční zrnitosti. Provedli jsme podrobnou analýzu experimentální sestavy a to jak pro volné, tak pro obrazové pole. Určili jsme teoretické rozlišení a nejistoty měření hledaného úhlu rotace ω_y , popsali a promysleli jsme si geometrické uspořádání experimentu v laboratoři. Následnou montáží jednotlivých prvků, nutných pro měření, jsme sestavili experimentální sestavu. Samotné měření pak probíhalo s využitím počítače a moderních optoelektronických prvků poměrně rychle. Výsledky měření jsme vyhodnotili v poslední kapitole. Na závěr si však ještě uvedeme ověřené předpoklady, ke kterým jsme se propracovali v průběhu experimentu.

Cílem práce bylo srovnání naměřených rotací ve zkoumaného předmětu volném a obrazovém poli. Experimentální měření ukázalo, s jakou přesností jsme schopni zaznamenat malé rotace předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti. Už z teoretické části jsme předpokládali velice přesné měření. Naše podmínka se potvrdila a v laboratoři jsme dosáhli pěkných výsledků pro volné i pro obrazové pole. Metoda korelace polí koherenční zrnitosti se ukázala, jako vhodný nástroj k měření velmi malých úhlů. Řádově jsme měřili desetiny až jednotky úhlových minut a to s vysokou přesností měření. Potvrdili jsme předpoklad vyšší rozlišovací schopnosti měření v obrazovém poli následkem vždy většího posuvu pole koherenční zrnitosti než v případě volného pole.

V rámci experimentu jsme nemohli měřit menší rotaci předmětu. Byli jsme omezeni rotačním stolečkem, který měl nejmenší možný krok právě $0,5'$. Z teoretických výpočtů bychom byli schopni měřit i mnohem menší úhly. Při měření minimálních rotací bychom se však museli zamyslet nad významem a především možným využitím měřicí metody v praxi.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HRABOVSKÝ, M., BAČA, Z., HORVÁTH, P.: Koherenční zrnitost v optice. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2001.
- [2] KADONO, H., TAKAHASHI, G., TOYOOKA, S.: Monitoring of biological activity of plant using difference-image of biospeckle. In *19th Congress of the International Commission for Optics on „Optics for the Quality of Life“*, Consortini, A., Righini, G. C., eds., *Proc. SPIE* **4829**, pp 955-956, 2002.
- [3] RUIZ GALE, M. F., MOLINARO, S., HOGERT, E. N., GAGGIOLI, N. G.: New measures of the refractive index in liquids using speckle patterns. In *20th Congress of the International Commission for Optics on „Challenging Optics in Science & Technology“: Optical Design and Fabrication*, Breckinridge, J., Wang, Y., eds., *Proc. SPIE* **6034**, pp. 501-505, 2006.
- [4] MALÝ, P.: Optika. Nakladatelství Karolinum, Praha, 2008.
- [5] DAINTY, J.C. (editor): Laser Speckle and Related Phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [6] YAMAGUCHI, I.: Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation. *Opt. Acta* **28**(10), pp. 1359-1376, 1981.
- [7] HORVÁTH, P., HRABOVSKÝ, M., ŠMÍD, P.: Full theory of speckle displacement and decorrelation in the image field by wave and geometrical description and its application in mechanics. *J. Mod. Opt.* **51**(5), pp. 725-742, 2004.
- [8] MLČOCH, J.: Úvod do fyzikálního měření. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2001.
- [9] WAGNEROVÁ, P.: Korelační vlastnosti polí koherenční zrnitosti. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci, 2004.

Seznam použitých fyzikálních veličin

Značka	Název	Jednotka	Rozměr
γ_{12}	Stupeň koherence	-	<i>bezrozměrný</i>
δ	Střední velikost průměru zrn	<i>m</i>	<i>m</i>
λ	Vlnová délka	<i>m</i>	<i>m</i>
L_O	Vzdálenost předmětu od snímače	<i>m</i>	<i>m</i>
D	Průměr osvětlené plochy povrchu předmětu	<i>m</i>	<i>m</i>
$N.A.$	Efektivní numerická apertura čočky	-	<i>bezrozměrný</i>
ω_y	Rotace předmětu okolo souřadné osy y	<i>rad</i>	<i>rad</i>
χ	Koeficient rozdělení	-	<i>bezrozměrný</i>
A_x	Posuv pole KZ ve směru souřadné osy x (volné pole)	<i>px</i>	<i>m</i>
A'_x	Posuv pole KZ ve směru souřadné osy x (obrazové pole)	<i>px</i>	<i>m</i>
Θ_O	Úhel směru pozorování (O - observer)	<i>rad</i>	<i>rad</i>
Θ_S	Úhel směru osvětlení (S - source)	<i>rad</i>	<i>rad</i>
L_C	Vzdálenost předmětu od zobrazovací čočky	<i>m</i>	<i>m</i>
L'_P	Vzdálenost snímače od zobrazovací čočky	<i>m</i>	<i>m</i>
f	Ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky	<i>m</i>	<i>m</i>
F'	Ohnisková vzdálenost zobrazovací čočky	<i>m</i>	<i>m</i>
$u_B(A_x)$	Nejistota měření typu B veličiny A_x	<i>px</i>	<i>m</i>
$u_B(\Theta_O)$	Nejistota měření typu B veličiny Θ_O	<i>rad</i>	<i>rad</i>
$u_B(L_O)$	Nejistota měření typu B veličiny L_O	<i>m</i>	<i>m</i>
$u_B(L_C)$	Nejistota měření typu B veličiny L_C	<i>m</i>	<i>m</i>
$u_B(L'_P)$	Nejistota měření typu B veličiny L'_P	<i>m</i>	<i>m</i>
$u(\omega_y)$	Nejistota měření složky rotace ω_y	<i>rad</i>	<i>rad</i>
$u_r(\omega_y)$	Relativní nejistota měření složky rotace ω_y	-	%
$r_{1,2}$	Normovaná funkce vzájemné korelace intenzit	-	%

$\Delta \omega_y$	Odchylka od střední hodnoty naměřené rotace ω_y předmětu	<i>rad</i>	<i>rad</i>
$\sigma \overline{\omega_y}$	Směrodatná odchylka průměru naměřené rotace ω_y předmětu	<i>rad</i>	<i>rad</i>
$\sigma \omega_y$	Směrodatná odchylka jednoho měření rotace ω_y předmětu	<i>rad</i>	<i>rad</i>

Seznam příloh

- A. Technické parametry He-Ne laseru
- B. Technické parametry rotačního stolku
- C. Detailní fotografie experimentální sestavy

A. Technické parametry He-Ne laseru



High-Power Helium Neon Laser Systems

- Output power to 35 mW
- $M^2 < 1.1$
- CE compliant (230 Vac version only)
- Complete systems, including power supply
- >95% TEM₀₀ mode

Melles Griot presents a new family of high-power helium neon lasers with the long life, excellent stability, and field-proven performances that has made Melles Griot the undisputed world-wide leader in helium neon laser technology.

The new 25 LHR/P 925, 828, and 928 lasers have guaranteed performances of 17, 25, and 35 mW, respectively, making them ideal for Raman spectroscopy, holography, fast scanning, and test and measurement applications. Most are available in either randomly or linearly polarized (with >500:1 extinction ratio) configurations, and can be mounted in a variety of orientations without sacrificing power or performance. Systems are convection cooled and operate from standard 100, 115 Vac or 230 Vac outlets.

BEAM DELIVERY SYSTEMS

Melles Griot manufactures a variety of fiber-optic beam delivery systems and beam expanders that can be used with the lasers offered in this catalog. For a complete description of these products, see Chapter 47, *Laser Accessories*.

SPECIFICATIONS: HIGH-POWER HELIUM NEON LASER SYSTEMS

Wavelength: 632.8 nm (red)
 Output Mode: TEM₀₀ (>95%)
 Angular Drift: <0.03 mrad after 30 min
 Amplitude Stability
 Mode Sweeping^{**}: <5%
 Long-Term Drift: ±2%/hr

Electrical Specifications:
 Input Voltage: 100, 115, or 230 Vac ±10%
 Input Frequency: 50–60 Hz

General Specifications:
 Temperature:
 Operating: –20°C to +40°C
 Nonoperating: –40°C to +80°C
 Altitude:
 Operating: 0–3000 m
 Nonoperating: 0–5800 m
 Humidity:
 Operating: 0–90%
 Nonoperating: 0–100%
 Shock: 25 g for 11 msec
 Safety Certification: CDRH Class IIIB, IEC Class 3B

^{**}Less than 2% for 25 LHR 925 and 25 LHP 925


High-Power Helium Neon Laser Systems

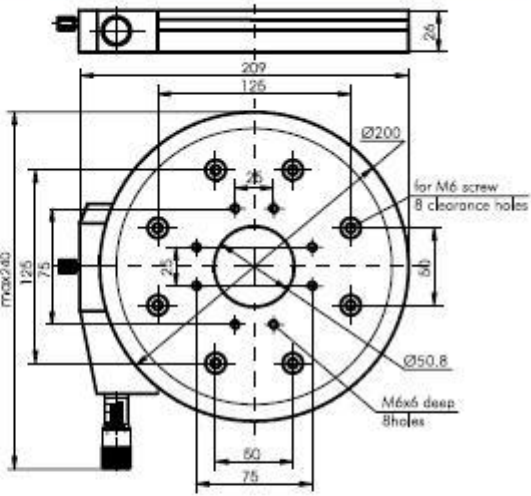
Output Power (mW)	Beam Diameter 1/e ² (mm)	Beam Divergence 1/e ² (mrad)	Noise (30 Hz–10 MHz)	Polarization Ratio	Longitudinal Mode		PRODUCT NUMBER*
					Spacing (MHz)	Package Configuration	
17.0	0.96	0.84	<0.5% rms	Random	257	Cylindrical	25 LHR 925
17.0	0.96	0.84	<0.5% rms	Linear	257	Cylindrical	25 LHP 925
25.0	1.24	0.68	<1.0% rms	Linear	165	Rectangular	25 LHP 828
35.0	1.24	0.68	<1.0% rms	Linear	165	Rectangular	25 LHP 928

*Add the appropriate suffix to the product number to indicate input voltage: -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac, or -461 for 100 Vac.

B. Technické parametry rotačního stolku

860-0160
ROTATION STAGE OF BIG PLATFORM





- 200 mm platform
- 360° rotation
- 10° fine adjustment
- Ø 50.8 mm (2") clear aperture

The Rotation Stage of Big Platform 860-0160 is used to manually rotate large optical components through continuous 360° with accuracy of 1°, and to adjust them finely within 10° by a micrometer, with accuracy of 0.5 arcmin. The stage has 50.8 mm clear aperture.

The platform has a pattern of M6 mounting holes for components. Fasten the stage by M6 screws for which the base has 8 clearance holes. Access them from the top through Ø11 mm holes in the platform.

Code	Price, EUR
860-0160	399

SPECIFICATIONS	
Rotation range	
coarse	360°
fine	10°
Reading accuracy	0.5 arcmin
Sensitivity	0.1 arcmin
Wobble	1 arcmin
Load capacity:	
horizontal	15 kg
Weight	2.55 kg

C. Detailní fotografie experimentální sestavy

