

UNIVERZITA PALACKÉHO
V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ladislav Stanke

2010

UNIVERZITA PALACKÉHO
V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA OPTIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv typu numerické korelace struktur koherenční zrnitosti
na měření translace zkoumaného předmětu metodou korelace
polí koherenční zrnitosti

Autor:	Ladislav Stanke
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Optika a optoelektronika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
Termín odevzdání práce:	

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci "Vliv typu numerické korelace struktur koherenční zrnitosti na měření translace zkoumaného předmětu metodou korelace polí koherenční zrnitosti" vypracoval sám, s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Olomouci 13. 5. 2010

.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce RNDr. Pavlu Horváthovi, Ph.D. za veškerou pomoc, poskytnuté rady, jak z teoretické, tak praktické oblasti, čas věnovaný práci v laboratoři a konzultacím, které vedly ke zpracování této bakalářské práce.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora: Ladislav Stanke

Název práce: Vliv typu numerické korelace struktur koherenční zrnitosti na měření translace zkoumaného předmětu metodou korelace polí koherenční zrnitosti

Typ práce: Bakalářská

Pracoviště: Společná laboratoř optiky
Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu
Akademie věd České republiky

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

Rok obhajoby práce: 2010

Abstrakt:

V rámci této práce bude popsána aplikace bezkontaktní optické měřicí metody pro měření translace předmětu fungující na bázi korelace polí koherenční zrnitosti, její teoretické předpoklady a nutné technické vybavení. Cílem této práce je zjistit, zda-li je možné využít binární korelace polí namísto 8-bitové korelace, a dále posoudit, jak bude ovlivněna přesnost měření v případě využití binární korelace.

Klíčová slova: Koherence, koherenční zrnitost,
metoda korelace polí koherenční zrnitosti,
translace předmětu;

Počet stran: 70

Počet příloh: 4

Jazyk: Český

Bibliographical identification:

Author's first name and surname: Ladislav Stanke

Title: Influence of type of speckle patterns
numerical correlation on translation
measurement of an object under investigation
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.

Year of presentation: 2010

Abstract:

In this work will be described application of non-contact optical measurement method for measurement of an object translation, which uses correlation of speckle patterns, its theoretical prerequisites and necessary technical equipment. Aim of this work is to find out whether is or not possible to use binary correlation instead of 8-bit correlation, and consider the amount of error which brings the application of binary correlation.

Keywords: Coherence,
object translation,
speckle, speckle correlation method;

Number of pages: 70

Number of appendices: 4

Language: Czech

Obsah

Úvod	1
1 Teoretické předpoklady a použité technické vybavení	2
1.1 Koherence	2
1.2 LASER	5
1.3 Koherenční zrnitost	7
1.4 Polovodičové snímače světla	9
1.5 Translační stolek	10
2 Optimalizace experimentu	11
2.1 Vztah mezi deformací předmětu a posuvem pole koherenční zrnitosti	11
2.1.1 Složky tenzoru malé deformace používané pro popis lineární translace	12
2.1.2 Korelační metoda	13
2.2 Optimalizace experimentální sestavy	15
2.3 Analýza nejistot měření	21
2.4 Shrnutí výsledků optimalizace experimentální sestavy	29
3 Experiment	31
3.1 Měření translace a_x předmětu - Experimentální sestava 1	31
3.2 Měření translace a_x předmětu - Experimentální sestava 2	40
4 Vyhodnocení experimentálně získaných dat	50
4.1 Kvantitativní vyhodnocení výsledků	50
4.2 Kvalitativní vyhodnocení výsledků	54
Závěr	56
Seznam použité literatury	57
Přehled použitých zkratk	58
Přehled použitých konstant, fyzikálních veličin, jejich rozměrů a jednotek	59

Přílohy	61
A: Technická data použitého laseru	61
B: Technická data řídicí karty	63
C: Technická data aktuátoru	64
D: G-kód pro práci s translačním stolkem	66
Fotopříloha	67

Úvod

Bakalářská práce popisuje optickou měřicí metodu, která postupně nachází uplatnění v mnoha fyzikálních i technických oborech. Jedná se o metodu korelace polí koherenční zrnitosti využívající všechny moderní prostředky, které nám současná fyzika nabízí. Tato metoda je v prezentovaném experimentu, aplikována na měření translace předmětu v rovině jeho povrchu. Cílem práce je pak zjistit, zda-li je možné využít binární korelace polí koherenční zrnitosti, namísto běžně používané 8-bitové a posoudit její vliv na přesnost měření.

Předložená bakalářská práce je rozdělena na čtyři tématické kapitoly. Každá z kapitol je dále členěna na podkapitoly.

Hlavním cílem první kapitoly je připomenout základní teorii koherence, popsat mechanismus vzniku polí koherenční zrnitosti a vysvětlit funkci jednotlivých technických prostředků, které využíváme pro zkoumání těchto polí.

Úkolem druhé kapitoly je objasnit vztah mezi posuvem pole koherenční zrnitosti a translací zkoumaného předmětu, popsat experimentální sestavu, provést analýzu její geometrie, vypočítat citlivosti a nejistoty měření hledané složky translace předmětu v souvislosti s geometrií experimentální sestavy a konečně nalézt sestavu vhodnou pro, v této práci, prezentovaný experiment.

Třetí kapitola se týká samotného experimentu. Je vysvětlen průběh měření translace předmětu a provedena jeho realizace. Naměřené experimentální hodnoty translace předmětu jsou pak, z důvodu větší přehlednosti uvedeny v tabulkách. Cílem experimentu je zjistit použitelnost binární korelace polí koherenční zrnitosti pro stanovení translace předmětu.

Ve čtvrté kapitole dojde ke shrnutí celého experimentu. Jsou analyzovány výsledky zjištěné pomocí tradiční 8-bitové a binární korelace polí koherenční zrnitosti. Je vysloven názor, o možnosti praktického využití binární korelace. Dále je zmíněno za jakých podmínek a do jaké míry budou měření uskutečněná binární korelací přesná.

Příloha na konci práce obsahuje technická data použitých přístrojů (laseru, translačního stolku a aktuátoru), zdrojový kód programu pro ovládání aktuátoru translačního stolku a fotografie, které čtenáři umožní představit si, jak je experiment realizován.

1 Teoretické předpoklady a použité technické vybavení

Pro pochopení vzniku pole koherenční zrnitosti je potřeba uvést alespoň základní poznatky z teorie koherence světla. V první podkapitole proto vysvětlíme elementární principy jak časové, tak prostorové koherence světla. V dalších podkapitolách se pak budeme věnovat technickým prostředkům, které jsou nezbytné pro realizaci měření využívajícího metody korelace polí koherenční zrnitosti. Mezi tyto prostředky patří nejenom laser, nutný pro vytvoření pole koherenční zrnitosti, a snímače světla, které potřebujeme pro záznam řezu tohoto pole, ale také například translační stolek, který využijeme pro realizaci přesné translace předmětu. V neposlední řadě si objasníme samotný vznik pole koherenční zrnitosti, historii objevu tohoto jevu a možnosti jeho využití v technické praxi.

1.1 Koherence

Z fenomenologického hlediska bychom mohli říci, že koherentní záření [1] je každé záření, které je schopno interferovat. Ovšem s tímto tvrzením se nemůžeme spokojit, pokud chceme důkladně pochopit mechanismus vzniku koherence a důsledky, které koherence způsobuje. Pro bližší popis tohoto jevu využijeme znalostí statistiky a teorie elektromagnetického pole.

Pokud si světlo představíme jako vlnové balíky, které jsou každou chvíli emitovány ze zdroje záření, pak existuje určitá koherenční doba, po kterou se světelná vlna dá matematicky popsat jako harmonická funkce. Tuto dobu nazýváme také koherenční čas a značíme jej τ_0 . Celý jev poté označujeme časovou koherencí [2] světla. Po uplynutí koherenční doby dojde ke skoku fáze vlny o náhodnou hodnotu.

S využitím Fourierovy transformace si můžeme všimnout vztahu mezi koherenční dobou τ_0 a spektrální šířkou záření $\Delta\nu$. Tento vztah lze zjednodušeně zapsat jako

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{\tau_0}. \quad (1)$$

Koherenční délka l_c , kterou vlna urazí během koherenčního času τ_0 , se dá vyjádřit jako

$$l_c = c\tau_0 \approx \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (2)$$

kde c je rychlost světla.

Dále si můžeme popsat vztah mezi šířkou spektra $\Delta\lambda$ daného zdroje, jeho vlnovou délkou λ a koherenční délkou l_c . Matematicky tuto skutečnost pojmem následovně

$$l_c \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (3)$$

Jestliže je nyní záření rozštěpeno na dva svazky a proveden dvousvazkový interferenční experiment s dráhovým rozdílem menším než je koherenční délka l_c , budeme schopni pozorovat interferenční obrazec. Pro celkovou intenzitu I interferenčního obrazce v místě stínítka platí

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi, \quad (4)$$

kde I_1 a I_2 vyjadřují intenzity dvou zdrojů záření a $\Delta\varphi$ značí jejich vzájemné fázové posunutí.

Pro kontrast (visibilitu) V interferenčního obrazce vyjádřeného pomocí maximální intenzity I_{max} a minimální intenzity I_{min} pak platí

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (5)$$

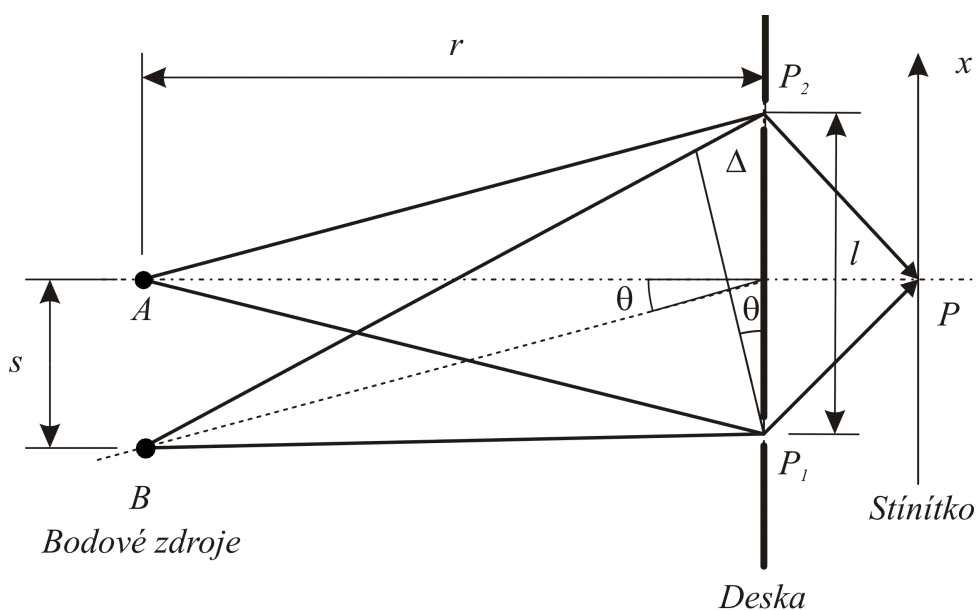
Dále položíme

$$V = |\tilde{\gamma}_{12}(\tau)|, \quad (6)$$

kde V je rovno absolutní hodnotě stupně koherence $\tilde{\gamma}_{12}(\tau)$. Pro případ zcela koherentního záření nabývá visibilita V a zároveň absolutní hodnota stupně koherence $\tilde{\gamma}_{12}(\tau)$ velikosti

$$V = |\tilde{\gamma}_{12}(\tau)| = 1, \quad (7)$$

naopak pro zcela nekoherentní záření nabývají jmenované veličiny nulové hodnoty.



Obr. 1 Schéma k výkladu prostorové koherence

Dále je třeba objasnit prostorovou koherenci záření [2]. Mějme dva stejně intenzivní bodové zdroje záření A a B (viz Obr.1). Vzájemnou koherenci těchto dvou zdrojů pozorujeme v bodě P na stínítku. V bodech P_1 a P_2 , které jsou umístěny na desce předcházející stínítku, byly vytvořeny štěrbin. Zdroj A leží na ose úsečky tvořené body P_1 a P_2 , zatímco zdroj B leží na kolmici (procházející bodem A) k této ose ve vzdálenosti s od zdroje A . Každý ze zdrojů vytváří interferenční obrazec jako při Youngovu pokusu. Pokud jsou oba zdroje ve stejném bodě, jejich interferenční obrazce jsou identické a splývou. Pokud ovšem začneme zdroj B přemísťovat v rovině zdroje A směrem nahoru či dolů, budeme schopni pozorovat dva interferenční obrazce, které vůči sobě mění polohu. Interferenční proužky pozorujeme do té doby, dokud maxima prvního obrazce nesplynou s minimy druhého. To je situace, pro kterou platí, že světlo již není prostorově koherentní. Nás zajímá, do jaké míry je možné uskutečnit posun zdroje B , aby světlo bylo ještě prostorově koherentní, potažmo nevymizely interferenční proužky.

Z geometrie úlohy vyplývá, že maximum interferenčního obrazce tvořeného zdrojem A nastane v případě

$$AP_1 - AP_2 = 0, \quad (8)$$

naopak první minimum tvořené zdrojem B , které odpovídá nejmenšímu posunu s nastane v případě

$$BP_2 - BP_1 = \Delta = \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

kde λ je vlnová délka zdrojů.

Dále můžeme určit velikost úhlu θ mezi paprsky, které vyzařují zdroje A a B , ve vzdálenosti s od sebe

$$\theta \approx \frac{s}{r}, \quad (10)$$

kde r je vzdálenost mezi rovinou zdrojů a deskou se štěrbinami. Pokud jako l označíme vzdálenost mezi štěrbinami P_1 a P_2 , dostáváme vztah

$$\Delta \approx l\theta, \quad (11)$$

přičemž použitím obou předchozích vzorců (10) a (11) získáváme

$$\Delta \approx \frac{sl}{r}. \quad (12)$$

Tímto, s pomocí (9), dospíváme k vyjádření

$$AB < s \approx \frac{r\lambda}{2l}, \quad (13)$$

ze kterého vyplývá, že vzdálenost AB mezi dvěma zdroji světla musí být menší než

s , aby došlo k zachování koherence.

Pro případ, kdy mezi body A a B budou umístěny nekoherentní bodové zdroje, dostáváme podmínku analogickou k předchozí s tím, že ve jmenovateli vymizí faktor 2. Vzdálenost AB poté považujeme za konstantní rozměr plošného zdroje. Pro popis prostorové koherence v takovém případě zavádíme parametr šířky koherence l_s jako vzdálenost mezi body P_1 a P_2 , pro kterou ještě získáváme koherentní pole. Využitím (13) dostáváme podmínku pro šířku koherence

$$l_s < \frac{r\lambda}{s} \approx \frac{\lambda}{\theta}. \quad (14)$$

Z toho vyplývá, že viditelnost interferenčních proužků se bude zvětšovat se zmenšováním vzdálenosti mezi štěrbinami P_1 a P_2 . Je možné ukázat, že závislost mezi vzdáleností štěrbin a stupněm koherence je analogická k průběhu intenzity difrakce světla na kruhové apertuře. S využitím van Cittert-Zernikeovy [2] věty dostáváme přesnější tvar pro mezní vzdálenost dvou štěrbin jako

$$l_s = 1,22 \frac{\lambda}{\theta}. \quad (15)$$

Existuje analogie mezi vztahem (15) a střední velikostí zrn ve struktuře koherenční zrnitosti (viz podkapitola 1.3), které vznikají odrazem koherentního záření od předmětu.

1.2 LASER

LASER, v překladu z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation [3], je mechanismus pro generaci elektromagnetického záření pomocí stimulované emise. Ačkoli tento typ interakce záření s látkou popsal Albert Einstein již v roce 1905, první laser byl sestaven až v roce 1960 Theodorem Maimanem.

Elektron, který je excitován na energetickou hladinu E_2 , musí při přechodu na výhodnější nižší hladinu E_1 uvolnit energii ($E_2 - E_1$). Může se jednat o foton, v tom případě mluvíme o spontánní emisi [2] světla s frekvencí

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (16)$$

kde písmenem h značíme Planckovu konstantu. Uvolnění energie ale nemusí být vždy provázeno emisí světla, v takovém případě máme na mysli nezářivý přechod.

O stimulované emisi hovoříme v případě, kdy excitovaný atom je fotonem o frekvenci

ν_{21} stimulován k přechodu na výhodnější nižší energetickou hladinu za emise dalšího fotonu. V tomto případě se vlastnosti získaného světla oproti spontánní emisi zásadně liší. V případě spontánní emise je světlo vyzařováno do všech směrů a s náhodnou fází, zatímco při stimulované emisi jsou směr a fáze totožné s dopadajícím zářením. Jinými slovy laserové záření je koherentní. Jak uvidíme v následující podkapitole 1.3, je koherentní záření nutný předpoklad ke vzniku pole koherenční zrnitosti.

Z čistě technického hlediska se laser skládá z [2]:

- aktivního prostředí,
- optického rezonátoru,
- zařízení dodávajícího energii - čerpání.

Podle typu aktivního prostředí lasery dále dělíme na [2]:

- excimerové,
- plynové,
- polovodičové,
- barvivové,
- pevnolátkové.

Generace záření vzniká dodáním energie (čerpáním) do aktivního prostředí, které je vyvedeno z termodynamické rovnováhy. Čerpání se může provádět mnoha způsoby, např. opticky svícením na látku, elektricky průchodem elektrického náboje, chemicky, atd. Čerpání zajistí, že vyšší energetická hladina je populována více, než nižší - dochází k inverzi populace, která způsobuje vznik spontánní emise. Spontánně emitované záření je zpětnou vazbou, pomocí optického rezonátoru, dále zesilováno - jsou vyvolávány stimulované přechody.

Při obíhání světla mezi zrcadly dochází ke ztrátám. Navíc jedno ze zrcadel je polopropustné, proto, aby laser generoval světlo, musí zesílení světla za jeden oběh překročit velikost ztrát.

Výstupní svazek laseru je gaussovského charakteru a je dobře manipulovatelný pomocí optických soustav. (Technická data laseru použitého pro prezentovaný experiment viz Příloha A práce)

1.3 Koherenční zrnitost

Koherenční zrnitost je náhodné pole prostorových interferenčních objektů, které vzniká za vhodných podmínek v celém poloprostoru před předmětem v případě odrazu koherentního záření od předmětu, nebo za předmětem v případě průchodu koherentního záření fázovým předmětem. Podle posledních studií, které byly provedeny, mají interferenční objekty charakteristický doutníkový tvar [4]. Prostorové interferenční objekty ale pouhým okem nepozorujeme, viditelný je pouze řez tímto polem - dostáváme strukturu koherenční zrnitosti. Po krátkém historickém úvodu, jak byl jev koherenční zrnitosti objeven, si vysvětlíme za jakých podmínek dochází ke vzniku polí koherenční zrnitosti.

Mezi první pozorovatele charakteristické granulární struktury patřil již Sir Isaac Newton [5], který si například také povšiml rozdílné prostorové koherence záření planet a hvězd. Později strukturu koherenční zrnitosti pozoroval Karl Exner, který v roce 1877 dokonce pořídil jeden z jejich prvních náčrtů. Koherenční zrnitost pozoroval za vzniku Fraunhoferovy difrakce na částicích, kterými posypal skleněnou desku. Pochopitelně v té době ještě Exner neměl k dispozici plně koherentní zdroj záření, ale i přesto byla jeho koherence dostatečná pro vznik pole koherenční zrnitosti v centrálním kroužku Fraunhoferovy difrakce. První fyzik, který vyfotografoval strukturu koherenční zrnitosti, byl v roce 1914 Max von Laue. Využil velice podobnou metodu jako už před ním Exner. Se znalostí, že vznik pole koherenční zrnitosti je ovlivněn také monochromatickostí zdroje, osvětloval desku posypanou práškem z plavuně téměř monochromatickým světlem. Jako zdroj záření využil uhlíkovou obloukovou lampu, jejíž světlo dále rozložil pomocí hranolu a spektrum v intervalu $420 - 430 \text{ nm}$ použil pro osvětlení vzorku. Von Laue podal také poměrně kompletní statistický popis struktury koherenční zrnitosti nalezené v centrálním kroužku Fraunhoferovy difrakce včetně odvození hustoty pravděpodobnosti intenzity druhého řádu a autokorelační funkce intenzity.

Vidíme tedy, že struktura koherenční zrnitosti byla pozorována již mnohem dříve před vynálezem laseru, ačkoli největší pozornost těmto polím je věnována až právě s nástupem laseru v 60. letech 20. století. Je to způsobeno tím, že silná koherence laserového svazku vytváří pole koherenční zrnitosti mnohem snáze, než jiné zdroje viditelného záření.

Nejdříve byl tento jev považován za čistě parazitní, hlavně při holografii a holografické interferometrii, kde je největším zdrojem šumu. Od té doby se ale našlo také mnoho forem využití koherenční zrnitosti, ať už se jedná o měření drsnosti povrchu předmětu, deformace předmětu, refrakčního stavu oka, kódování a dekodování informací, měření průměrů hvězd a detekce dvojhvězd, atd [5].

Studium jevu koherenční zrnitosti se ubíralo dvěma směry, potlačením tohoto jevu [6] (speckle reduction)¹ a jeho využitím.

V praxi se můžeme setkat se třemi základními mechanismy vzniku koherenční zrnitosti:

1. odraz koherentního záření od drsného povrchu předmětu,
2. průchod koherentního záření opticky nehomogenním prostředím - s náhodnými fluktuacemi indexu lomu,
3. průchod koherentního záření rozptylujícím prostředím.

Jelikož v experimentu, který si popíšeme v další části práce, využijeme pouze případ odrazu, nebudeme se dalším dvěma způsoby vzniku pole koherenční zrnitosti zabývat.

Považujme předmět za ideální odrazné těleso, které veškeré dopadající záření odrazí zpět. Předpokládejme, že povrch tohoto předmětu není v celém rozměru ideálně plochý, nýbrž je tvořen shlukem různě prostorově a úhlově posunutých plošek mikroskopických rozměrů. Pokud nyní laserovým svazkem osvětlíme povrch předmětu, tak svazek osvětlí nekonečně mnoho plošek. Plošky absorbují záření a emitují jej nazpět. Chovají se jako sekundární zdroje kulových vln. Vzhledem k náhodnému geometrickému uspořádání těchto plošek se jediný laserový svazek rozpadá na nekonečně mnoho dalších a tyto spolu interferují. Vytvářený obrazec je náhodným prostorovým rozložením komplexní amplitudy a intenzity světla. Vzniká pole koherenční zrnitosti. Toto intenzitní pole je v rovinném řezu tvořeno náhodným shlukem světlých a tmavých skvrn. Střední velikost zrn [4] ve struktuře koherenční zrnitosti je úměrná λ/θ identicky ke vztahu (15). Jednotlivé body pole mají určitý statistický charakter, který budeme dále zkoumat, abychom byli schopni popsat souvislost mezi tímto polem a například obecnou deformací předmětu.

Zmíňme také, že podobná struktura vzniká i v jiných oblastech elektromagnetického záření a vzhledem ke korpuskulárně-vlnovému dualismu také působením některých částic.

¹Jelikož vznik pole koherenční zrnitosti je silně ovlivněn polarizací zdroje (laser je polarizovaný zdroj záření), používají se pro potlačení vzniku pole koherenční zrnitosti různé typy depolarizátorů.

1.4 Polovodičové snímače světla

Podobně jako laser i všechny snímače světla využívají mechanismus interakce světla s látkou. Na rozdíl od laseru ale nebude cílem, pomocí čerpání energie, generovat záření, nýbrž přesně naopak, pomocí dopadu záření, získat energii. Nejlépe nějaký druh dále zpracovatelného signálu, jakými jsou např. náboj, proud, nebo napětí.

V podstatě existují dva základní směry, kterými se vývoj těchto snímačů ubíral - technologie CCD [7] a CMOS. Samozřejmě existují i další typy detektorů, ale jedná se o specializované snímače, o kterých v kontextu s později prezentovaným experimentem nemá smysl hovořit.

Zatímco CCD je technologie, která se téměř výlučně používá pro optoelektronické snímače, technologie CMOS se využívá i v obecné elektrotechnice, hlavně pro výrobu integrovaných obvodů, jakými jsou např. procesory, paměti, atd. CCD je zařízení pro posun elektrického náboje z místa jeho záznamu, který byl pořízen např. fotokapacitorem, do místa jeho zpracování. Můžeme tedy říci, že se v podstatě jedná o druh posuvného registru. Tento druh snímače neumožňuje v reálném čase přistupovat k informacím z jednotlivých pixelů.

V prezentovaném experimentu využijeme takzvaného APS [8, 9] CMOS senzoru, neboli senzoru s aktivními pixely. Aktivní znamená, že každý z pixelů, nebo určitá malá matice pixelů, disponuje svým vlastním zesilovačem. Každý z těchto elementů má svou X-Y adresu a je možné v reálném čase odečítat hodnotu na každém z nich. Na rozdíl od oka, jehož spektrální citlivost se pohybuje v rozmezí 450 – 700 nm, je křemík citlivý v rozsahu vlnových délek 400 – 1000 nm. Polovodičovým senzorem jsme tedy schopni zachytit jak vysokoenergetické UV fotony, tak blízkou infračervenou oblast. Dále je snímač charakterizován svým rozlišením v pixelech. Typický lineární rozměr jednoho pixelu se pohybuje od 4 do 10 mikrometrů, tvar bývá většinou čtvercový. Více pixelů znamená větší rozlišení a samozřejmě větší objem dat, což nemusí být vždy výhodou.

Základním principem snímače je, že dopadající foton je přeměněn na pár elektron - díra. Většinou se zaznamenávají elektrony, zatímco díry se vyřazují.

Dále zavádíme kvantovou účinnost detektoru, která vyjadřuje poměr mezi počtem dopadajících fotonů a počtem vytvořených elektronů. Pro viditelné světlo je tento poměr vždy menší než jedna a je silně závislý na vlnové délce světla.

Pro snímání získaných hodnot je důležitý převodní zisk, který vyjadřuje hodnotu napětí na jeden vygenerovaný elektron. Typicky se tato hodnota pohybuje v rozsahu 1 – 10 μV . Vyšší napětí většinou znamená lepší signál, ale omezuje totální rozsah hodnot, které mohou být zaznamenány. Napětí generované zesilovači je následně převedeno do ADC, kde jsou spojitě hodnoty převedeny na bity, které jsou následně

přečteny měřicím softwarem.

V experimentu popisovaném dále je využíván maticový CMOS detektor s monochromatickým (vybavený 8-bitovým kódováním, čili dostáváme $2^8 = 256$ odstínů šedi) čipem ZORAN ZR 32112 MLC, který obsahuje 1288×1032 pixelů. Každý pixel má tvar čtverce o rozměrech $(7,5 \times 7,5) \mu m^2$.

1.5 Translační stolek

Neméně důležitou součástí popisovaného experimentu je také translační stolek² umožňující realizovat přesné malé translace předmětu, tzn. řádově v jednotkách μm . Míra zadané translace stolku bude konfrontována s experimentálně naměřenou translací a_x předmětu, kterou budeme zjišťovat pomocí korelace polí koherenční zrnitosti.

Stolek je vybaven motorickým posuvem a je plně automatizován. K jeho ovládání se používá speciální počítačová karta společně s dedikovaným ovládacím programem, který využívá takzvaného G-kódu³, podobně jako NC a CNC obráběcí stroje.

Základem řídicí karty je jediný integrovaný obvod, který řídí servomechanismus. Čip obsahuje lichoběžníkový generátor rychlostí a digitální kompenzační filtr. Další součástí karty je DAC, který vysílá signál pro řízení aktuátorů. Tento signál je ještě před vysláním do aktuátoru dodatečně zesílen.

Lichoběžníkový generátor rychlostí propočítává pozici aktuátoru na základě časových měření. Pro translace předmětu je využíván tzv. poziční operační mód. Tento mód vyžaduje zadání akcelerace, maximální rychlosti a pozice.

Řídicí modul je s aktuátorem propojen skrze krokový modulátor. Veškerá nastavení rychlosti, zrychlení a velikosti translace jsou kvantována. Před napsáním konkrétního G-kódu se tedy v příloženém software musí tyto hodnoty přepočítat na tzv. pulsy (counts).

²Technická data řídicí karty a aktuátoru viz přílohy B a C této práce.

³Ukázka G-kódu použitého k ovládání translačního stolku pro měření translace předmětu (viz Příloha D této práce).

2 Optimalizace experimentu

V předchozí kapitole jsme si popsali jev koherenční zrnitosti a jeho vznik. Cílem této kapitoly bude objasnit, jakým způsobem využít koherenční zrnitost k měření obecných deformací předmětu. Ukážeme vztah mezi posuvem pole koherenční zrnitosti a tenzorem malé deformace. Dále vysvětlíme využití korelační funkce ke stanovení posuvu pole koherenční zrnitosti.

2.1 Vztah mezi deformací předmětu a posuvem pole koherenční zrnitosti

Samotná struktura koherenční zrnitosti nám nepodá žádnou informaci o změně stavu předmětu, jako takového. Je třeba najít vhodné souvislosti mezi zaznamenanými poli koherenční zrnitosti a obecnou deformací předmětu. Jako motivaci si uveďme příklad fotografické metody [10] na bázi koherenční zrnitosti pro měření deformace předmětu. Její princip je následující. Předmět před obecnou deformací osvětlíme koherentním zdrojem záření a vzniklou strukturu koherenční zrnitosti exponujeme na fotocitlivou desku. Po provedení deformace předmětu opět zaznamenanáme strukturu koherenční zrnitosti na tutéž desku. Následně desku vyvoláme a opětovně osvětlíme koherentním zdrojem záření. Ve Fourierově rovině pak pozorujeme interferenční proužky podobné těm, které vznikají při Youngově pokusu [10]. Ze sklonu a frekvence těchto proužků jsme schopni zjistit, například, velikost a směr translace zkoumaného předmětu. Výše uvedená metoda je příkladem interferometrie na bázi koherenční zrnitosti. Fotografická metoda je ovšem zatížena značnou nevýhodou v tom, že exponované materiály se musí chemicky zpracovávat. V současné době se ale i v této metodě již využívá digitálních snímačů obrazu, které nahradily fotografické desky.

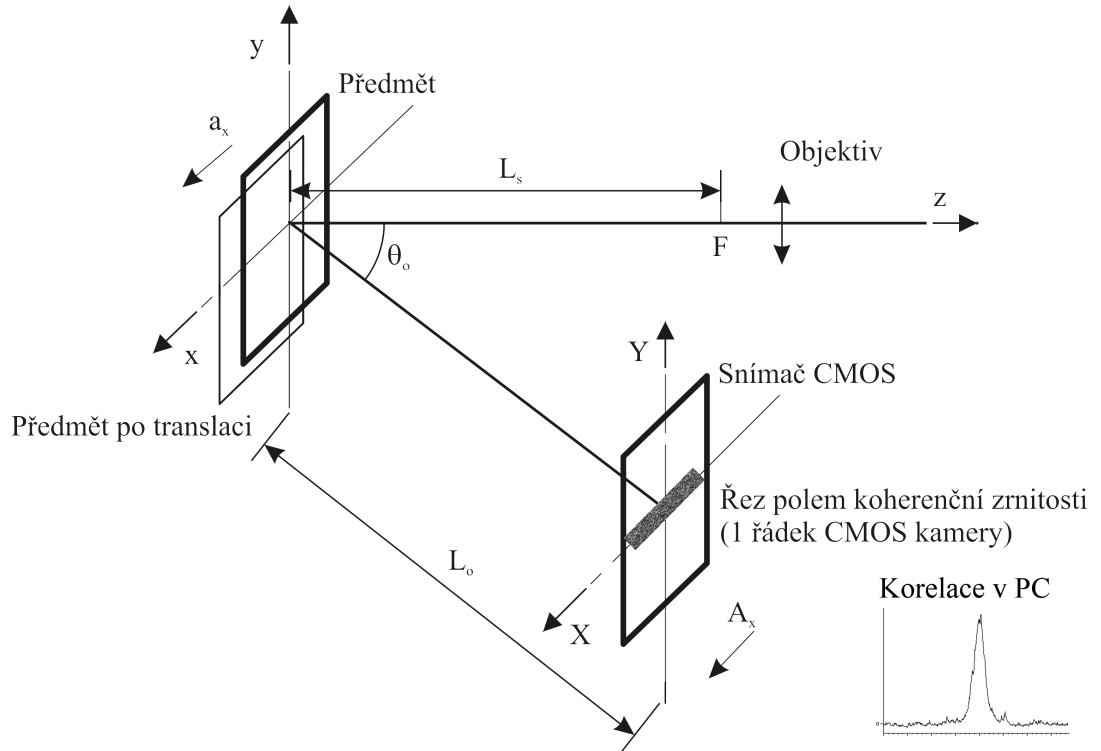
Díky existenci digitálních snímačů jsme schopni měření deformace předmětu na bázi koherenční zrnitosti provádět také užitím korelační metody [10], a to v kvazireálném čase. V této práci se budeme věnovat měření translace zkoumaného předmětu právě pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti.

Obecnou deformací elementu povrchu předmětu, kterou popisujeme pomocí tenzoru malé deformace, dochází k posuvu pole koherenční zrnitosti. Klíčem k měřením využívajících korelace polí koherenční zrnitosti je porovnání dvou intenzitních řezů v poli koherenční zrnitosti detekovaných před a po obecné deformaci zkoumaného

předmětu.

2.1.1 Složky tenzoru malé deformace používané pro popis lineární translace

Pro kvantifikaci stavu elementu povrchu předmětu před a po obecné deformaci zavádíme tzv. tenzor malé deformace. Přitom nás nezajímají fyzikální příčiny, které vedly ke změně, ale pouze jejich geometrický popis. Obecná deformace zahrnuje vlastní deformaci předmětu, translaci a také jeho rotaci. Jelikož v této práci bude vyhodnocována pouze translace předmětu, popis ostatních typů deformací zanedbáme.



Obr. 2 Znárodnění souřadnicového systému měření translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti

Pro stanovení translace předmětu ve 3D prostoru byly odvozeny v souladu s Obr.2 [12] následující vztahy mezi složkami tenzoru malé deformace a posuvem pole koherenční zrnitosti

$$A_X = a_x \left(\frac{L_o \cos^2 \theta_s}{L_s \cos \theta_o} + \cos \theta_o \right) - a_z \left(\frac{L_o \cos \theta_s \sin \theta_s}{L_s \cos \theta_o} + \sin \theta_o \right) \quad (17)$$

a

$$A_Y = a_y \left(\frac{L_o}{L_s} + 1 \right), \quad (18)$$

kde A_X a A_Y vyjadřují posuv pole koherenční zrnitosti ve směru souřadných os X a Y roviny detekce (X, Y), dále a_x , a_y a a_z jsou složky translace předmětu ve směru odpovídajících souřadných os x , y a z . Veličiny L_o a L_s značí vzdálenost snímače, respektive zdroje záření od roviny (x, y) povrchu předmětu. Úhel směru osvětlení, respektive směru pozorování značíme θ_s a θ_o . Vztah těchto veličin k reálné konfiguraci experimentální sestavy si můžeme demonstrovat na Obr. 2.

2.1.2 Korelační metoda

Výhodnou metodu stanovení posuvu pole koherenční zrnitosti nám nabízí statistika [11]. Posunutí pole koherenční zrnitosti lze kvantitativně popsat pomocí změny polohy maxima statistické funkce vzájemné korelace intenzit polí detekovaných před a po obecné deformaci [10] předmětu.

Pro popis této metody si můžeme zavést motivaci v jedné dimenzi. Mějme řádkový CMOS snímač, který bude pro jednoduchost zaznamenávat intenzity I v binárním režimu, ačkoli tradičně se zaznamenávají v režimu 8-bitovém. Cílem této práce je právě srovnání binární a 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti. Intenzity I_1 zaznamenáme před a I_2 po procesu (viz Tab. 1 ukazující intenzity na jednotlivých pixelech CMOS snímače).

Tab. 1 Hodnoty zaznamenané před a po obecném procesu

Intenzita I_1 před procesem	Intenzita I_2 po procesu
1	1
1	0
0	1
0	1
1	0
0	0
1	1
0	0
0	1
1	1

Jestliže chceme nyní určit podobnost mezi těmito dvěma intenzitními záznamy pole koherenční zrnitosti, využijeme definice funkce vzájemné korelace [10]. Pro jednodimenziální normovanou funkci vzájemné korelace platí vzorec

$$r_{1,2}(\Delta q) = \frac{\langle I_1(q) I_2(q + \Delta q) \rangle - \langle I_1(q) \rangle \langle I_2(q) \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2(q) \rangle - \langle I_1(q) \rangle^2} \sqrt{\langle I_2^2(q) \rangle - \langle I_2(q) \rangle^2}}, \quad (19)$$

kde intenzity I_1 jsou zaznamenány před procesem a I_2 po procesu.

Konkrétně, pro náš případ měření lineární translace předmětu ve směru souřadné osy x a využití maticového senzoru s diskretním počtem zaznamenaných hodnot intenzit I , lze vzorec (19) přepsat jako

$$r_{1,2}(\Delta x) = \frac{\frac{1}{N-\Delta x} \sum_{x=1}^{N-\Delta x} I_1(x) I_2(x + \Delta x) - \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_1(x) \cdot \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_2(x)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_1^2(x) - \left(\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_1(x)\right)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_2^2(x) - \left(\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N I_2(x)\right)^2}}, \quad (20)$$

což je jednodimenzionální normovaná funkce vzájemné korelace.

Pozorujeme, že tato funkce nabývá maxima (1, protože funkce je normována) pro hodnotu Δx rovnající se námi hledanému posuvu pole koherenční zrnitosti po procesu. Pokud si do vzorce (20) dosadíme hodnoty z Tab. 1 pozorujeme, že došlo k posuvu pole koherenční zrnitosti o 2 pixely ($A_x = 2px$), o čemž se můžeme v Tab. 1 také jednoduše přesvědčit. V reálném procesu, ale nemusí dojít k pouhému posunutí těchto hodnot, ale také k jejich změně, tento jev nazýváme dekorelace.

Vzorec (20) platí pouze při použití maticových kamer, které mají diskretní pixely, matematicky obecnější tvar korelační funkce využívající integrace namísto sumace vypadá následovně

$$c(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g(x - \Delta x) dx, \quad (21)$$

kde písmenům $f(x)$ odpovídají hodnoty před procesem, $g(x)$ po procesu a Δx , které označuje posunutí na ose x . Tento tvar platí pro jednu dimenzi, pro větší počet dimenzí by se zvětšovala násobnost integrálu a počet funkcí, které bychom museli porovnávat. Vzhledem k tomu, že všechny snímače světla mají maticové rozložení pixelů, tak nás nemusí znepokojovat nahrazení integrálů sumacemi.

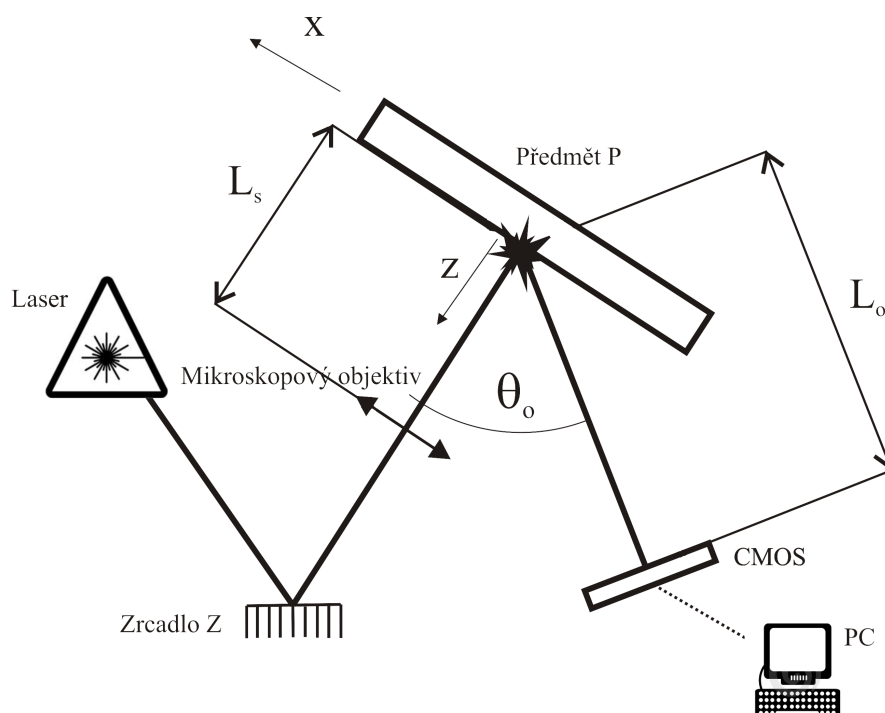
Velikosti posuvu Δx pole koherenční zrnitosti získané pomocí pozice maxima funkce vzájemné korelace (20) jsou dosazeny do vzorce (17), nebo (18) jako proměnné A_x , popřípadě A_y v souladu s tím, ve kterém směru jsme zaznamenávali posuv řezu pole koherenční zrnitosti. Ze znalosti geometrických parametrů experimentální sestavy jsme schopni pomocí vzorců (17) a (18) dopočítat velikost a směr translace předmětu. Schématické znázornění korelační metody nalezneme na Obr. 2, na kterém vidíme normovanou korelační funkci získanou porovnáním řezu pole koherenční zrnitosti před a po translaci a_x předmětu.

2.2 Optimalizace experimentální sestavy

Abychom dokázali získat co nejpřesnější hodnoty hledané složky translace zkoumaného předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti, je potřeba optimalizovat geometrii experimentální sestavy. Jelikož naším cílem není analyzovat všechny složky translace předmětu, nýbrž konfrontovat dva typy korelace pro měření translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x , využijeme nejjednodušší možné sestavy. Pro tento případ lze ze vztahu (17) odvodit vztah, který platí pro tzv. volné pole⁴ (experimentální sestava viz Obr. 3)

$$a_x = \frac{A_X}{\frac{L_o \cos^2 \theta_s}{L_s \cos \theta_o} + \cos \theta_o}, \quad (22)$$

kde A_X vyjadřuje velikost posuvu pole koherenční zrnitosti ve směru souřadné osy X , L_o a L_s jsou vzdálenosti od snímače a zdroje, θ_o a θ_s reprezentují úhly mezi snímačem, respektive zdrojem koherentního záření a osou předmětu.



Obr. 3 Schéma experimentální sestavy pro měření malých translací a_x předmětu ve směru souřadné osy x

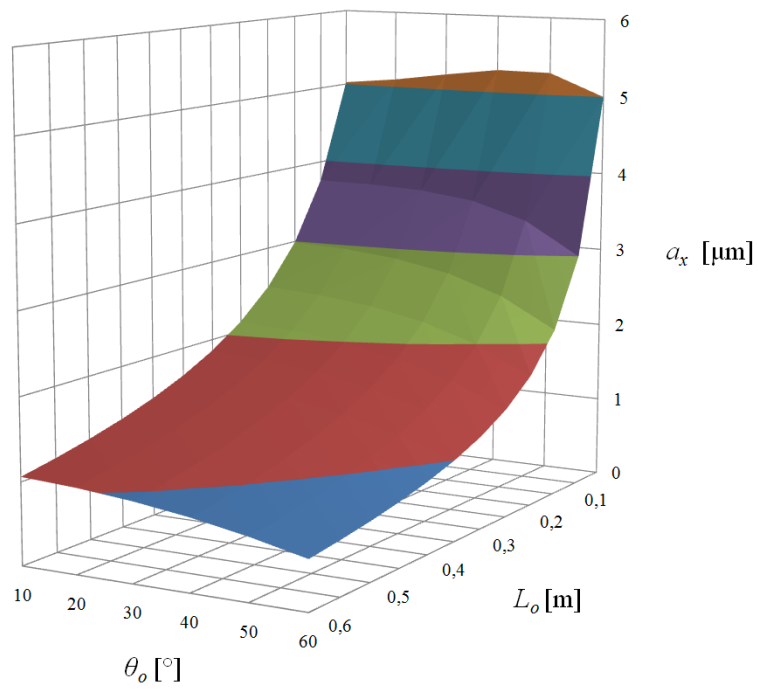
Analýzou tohoto vztahu v tabulkovém editoru, popřípadě pomocí matematického software pozorujeme, že rozlišení⁵ měření složky translace a_x předmětu se zvyšuje

⁴Mezi předmětem a snímačem nejsou žádné optické prvky.

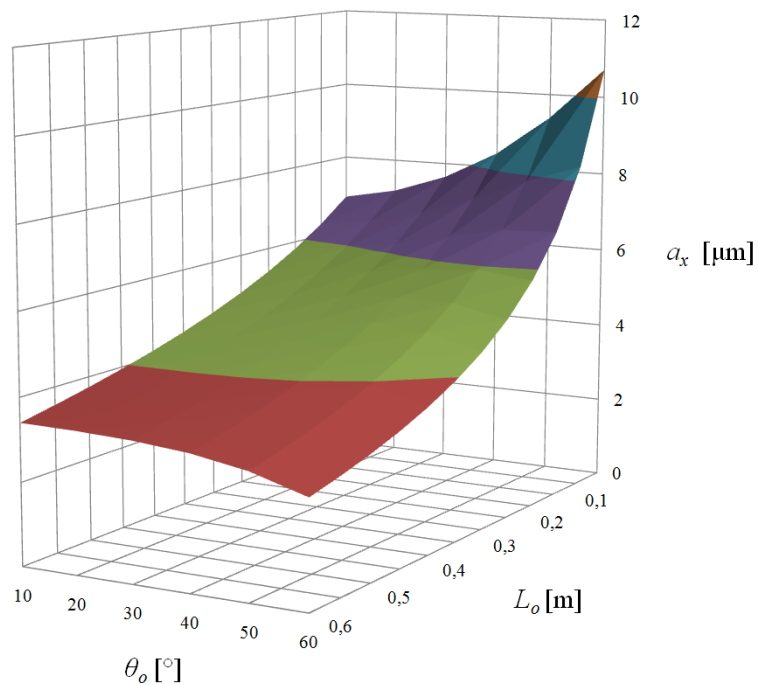
⁵Rozlišením měření složky translace a_x se rozumí míra detekované translace ve směru souřadné osy x odpovídající posuvu pole koherenční zrnitosti $A_x = 1 px$.

se snižováním vzdálenosti L_s mezi bodovým zdrojem (pasem laserového svazku) a předmětem, zvětšováním vzdálenosti L_o mezi předmětem a snímačem, nebo zvyšováním úhlu pozorování θ_o mezi paprskem dopadajícím na předmět a osou snímače.

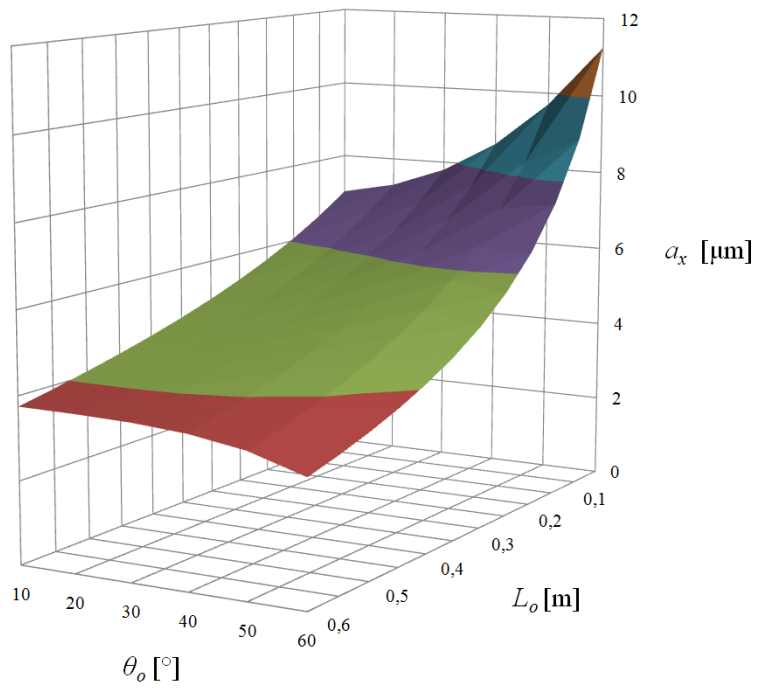
V následujících grafech (Obr. 4-6) si můžeme prohlédnout trendy rozlišení při různých geometrických nastaveních experimentální sestavy dle Obr. 3. Obrázek 7 pak ukazuje citlivost měření složky translace a_x předmětu v případě posuvu pole koherenční zrnitosti o $A_X = 10 px$.



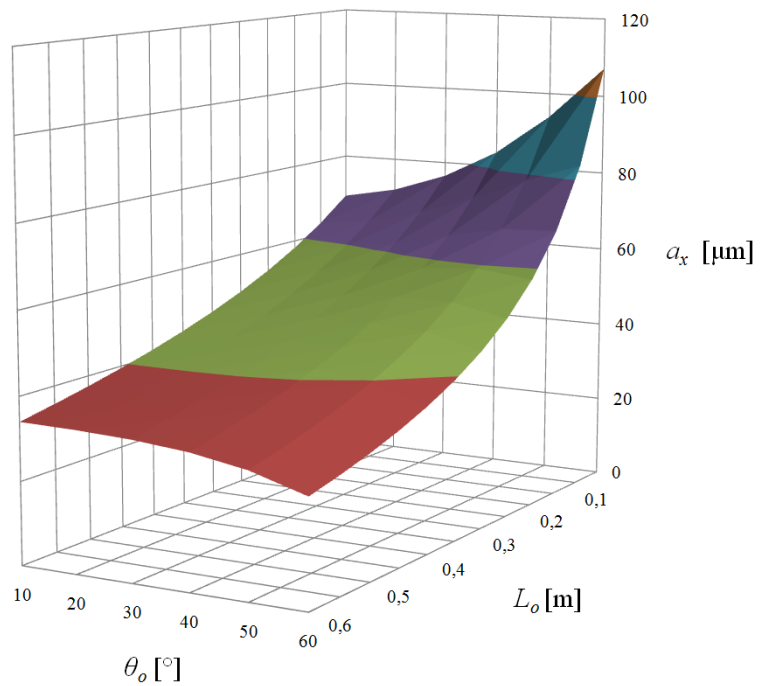
Obr. 4 Rozlišení měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,1\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



Obr. 5 Rozlišení měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



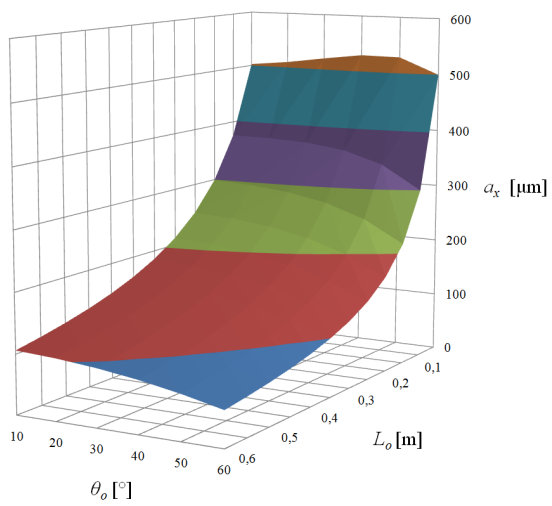
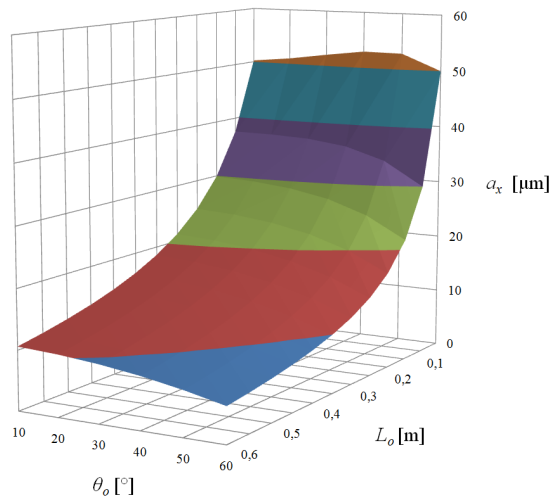
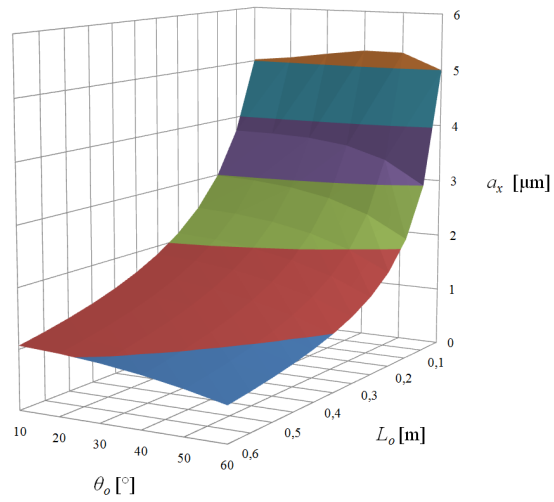
Obr. 6 Rozlišení měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,6\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



Obr. 7 Citlivost měření translace a_x předmětu při posuvu pole koherenční zrnitosti o $A_X = 10\text{ px}$ pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5\text{ m}$)

Změnou geometrie experimentální sestavy neměníme pouze její rozlišení, ale také měřicí rozsahy, ve kterých jsme schopni efektivně posoudit velikost translace předmětu. Na Obr. 8 si můžeme prohlédnout, jak velké translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x budeme schopni pozorovat při různých geometrických nastaveních a posuvech pole koherenční zrnitosti v rozmezí 1 px až 100 px. Měřicí rozsah odpovídá myšlenému útvaru, který by vznikl mezi prvním a posledním grafem na Obr. 8.

Vidíme sice, že při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 1 \text{ px}$ jsme schopni rozlišit velmi malé translace a_x předmětu, ale v další podkapitole si vysvětlíme, proč takové měření není příliš vhodné.



Obr. 8 Rozsah měření složky translace α_x při posunutích pole koherenční zrnitosti $A_X = 1, 10, 100 \text{ px}$ (shora) pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0, 1 \text{ m}$)

2.3 Analýza nejistot měření

Jakékoliv prováděné měření ztrácí smysl, pokud nevíme s jakou přesností bylo pořízeno. I sebelépe optimalizovaná experimentální sestava a použití těch nejmodernějších přístrojů nám nezaručí naprostou přesnost naměřených veličin. Z kvantové teorie víme, že již samotným měřením ovlivňujeme měřenou veličinu.

Odchylku oproti skutečné hodnotě měřené veličiny mohou ovlivnit chyby přístroje, nepřesnosti v nastavení experimentální sestavy, omezení lidských smyslů a neschopnost zajistit stálé podmínky při měření (např. teplota, tlak, vlhkost).

Abychom byli schopni kvantitativně [13 – 16] popsat přesnost měření, zavádíme tzv. nejistotu měření⁶. Tento parametr přidružený k výsledku měření nám charakterizuje v jakém intervalu a s jakou pravděpodobností může ležet skutečná hodnota naměřené veličiny.

Pro nepřímou měřenou veličinu, která nás v případě měření translace předmětu bude zajímat, musí nejistota měření zahrnovat dílčí nejistoty měření všech vstupních, přímo měřených, veličin využitých pro výpočet hledané veličiny. Pro celkovou nejistotu měření $u(v)$ nepřímou měřené veličiny $v = f(x, y, z, \dots)$ pak platí tzv. zákon šíření nejistot [15] v odmocninovém tvaru

$$u(v) = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 (u(x))^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 (u(y))^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 (u(z))^2 + \dots}, \quad (23)$$

kde $u(x)$, $u(y)$ až $u(z)$ vyjadřují hodnoty jednotlivých nejistot měření veličin x , y , z vstupujících do experimentu. Takto můžeme určit nejistotu měření veličiny funkčně spjaté s libovolným počtem přímo měřených veličin.

Aplikací zákona šíření nejistot na náš případ měření translace a_x předmětu, viz vzorec (22), dostáváme velikost celkové nejistoty měření $u(a_x)$ ve tvaru

$$\begin{aligned} u(a_x) &= \left(\left(\frac{\partial a_x}{\partial A_X}\right)^2 (u(A_X))^2\right. & (24) \\ &+ \left(\frac{\partial a_x}{\partial L_0}\right)^2 (u(L_0))^2 \\ &+ \left(\frac{\partial a_x}{\partial L_s}\right)^2 (u(L_s))^2 \\ &+ \left(\frac{\partial a_x}{\partial \theta_s}\right)^2 (u(\theta_s))^2 \\ &\left.+ \left(\frac{\partial a_x}{\partial \theta_0}\right)^2 (u(\theta_0))^2\right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

⁶Dříve se používal termín chyba měření.

Parciální derivací hledané veličiny a_x podle jednotlivých vstupních parametrů měření v předchozím vztahu (24) dostáváme

$$\begin{aligned}
u(a_x) = & \left(\left(\frac{1}{\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o)} \right)^2 (u(A_X))^2 \right. & (25) \\
& + \left(\frac{A_X \cos^2(\theta_s)}{\left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o) \right)^2 \cos(\theta_o)} \right)^2 (u(L_o))^2 \\
& + \left(\frac{A_X L_o \cos^2(\theta_s)}{\left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o) \right)^2 L_s^2 \cos(\theta_o)} \right)^2 (u(L_s))^2 \\
& + \left(\frac{2A_X L_o \cos(\theta_s) \sin(\theta_s)}{\left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o) \right)^2 L_s \cos(\theta_o)} \right)^2 (u(\theta_s))^2 \\
& + \left. \left(\frac{A_X \left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s) \sin(\theta_o)}{L_s \cos^2(\theta_o)} - \sin(\theta_o) \right)}{\left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o) \right)^2} \right)^2 (u(\theta_o))^2 \right)^{\frac{1}{2}},
\end{aligned}$$

kde A_X značí posuv pole koherenční zrnitosti ve směru odpovídající souřadné osy X . Veličiny L_o a L_s vyjadřují vzdálenost snímače, respektive zdroje záření od roviny povrchu předmětu, úhel osvětlení, respektive pozorování značíme θ_s a θ_o . Vztah těchto veličin k reálné konfiguraci experimentální sestavy vidíme na Obr. 3.

Abychom mohli určit výslednou nejistotu $u(a_x)$ měření translace a_x předmětu, musíme nyní stanovit nejistoty $u(A_X)$, $u(L_o)$, $u(L_s)$, $u(\theta_s)$ a $u(\theta_o)$ jednotlivých, přímo měřených veličin A_X , L_o , L_s , θ_s a θ_o .

Posuv pole koherenční zrnitosti A_X zjišťujeme pomocí maticové CMOS kamery. K měření využíváme jeden řádek kamery, pro který platí, že vzdálenost středů sousedních pixelů je $7,5 \mu\text{m}$. Vzdálenost mezi sousedními pixely zanedbáváme. Nejmenší detekovatelný posuv pole koherenční zrnitosti na kameře je roven posuvu o 1 pixel, tedy $A_X = 1px = 7,5 \mu\text{m}$. Maximální odchylka ΔA_X , které se dopouštíme při stanovení posuvu pole koherenční zrnitosti je rovna polovině myšleného dílku stupnice, tj. $\Delta A_X = 0,5px$. Předpokládáme-li, že velikost posuvu pole koherenční zrnitosti je mezi nejmenšími dílky (pixely) kamery stejně pravděpodobná, volíme koeficient rozdělení⁷ $\chi = \sqrt{3}$. Po dosazení získáváme podle [15] hodnotu nejistoty $u_B(A_X)$ posunutí pole A_X

⁷Pro další typy rozdělení platí následující velikosti koeficientu χ

$\chi = 3$	normální
$\chi = \sqrt{6}$	trojúhelníkové
$\chi = \sqrt{6} \div \sqrt{3}$	lichoběžníkové
$\chi = \sqrt{3}$	rovnoměrné
$\chi = \sqrt{2}$	inverzní trojúhelníkové
$\chi = 1$	Diracovo

koherenční zrnitosti jako

$$u_B(A_X) = \frac{\Delta A_X}{\chi} = \frac{0,5 px}{\sqrt{3}} \approx 2,2 \mu m. \quad (26)$$

Tato hodnota samozřejmě platí pouze pro snímače světla s roztečí pixelů 7,5 μm .

Podobným způsobem vypočteme i ostatní nejistoty měření vstupních geometrických parametrů. Uvažujme, že pro délková a úhlová měření využíváme měřidel dělených na milimetry, respektive úhlové stupně. Maximální odchylka, které se při měření dopouštíme, je rovna polovině nejmenšího dílku stupnice měřidla. Opět předpokládejme, že výskyt hledané veličiny je mezi nejmenšími dílky stupnice měřidla stejně pravděpodobný. Proto pro nejistoty měření $u_B(L_o)$, $u_B(L_s)$ a $u_B(\theta_o)$ vzdálenosti L_o snímače světla od povrchu předmětu, L_s vzdálenosti bodového zdroje (pasu gaussovského svazku) od povrchu předmětu a θ_o úhlu pozorování, který svírá osa předmětu s osou snímače světla platí následující vztahy

$$u_B(L_o) = \frac{\Delta L_o}{\chi} = \frac{0,5 mm}{\sqrt{3}} \approx 0,3 mm, \quad (27)$$

$$u_B(L_s) = \frac{\Delta L_s}{\chi} = \frac{0,5 mm}{\sqrt{3}} \approx 0,3 mm, \quad (28)$$

$$u_B(\theta_o) = \frac{\Delta \theta_o}{\chi} = \frac{0,5^\circ}{\sqrt{3}} \approx 5,0 \cdot 10^{-3} rad. \quad (29)$$

Všechny nejistoty měření optických a geometrických parametrů experimentální sestavy jsou typu B [16]. To znamená, že pro stanovení jejich velikostí nepotřebujeme získat statistický soubor měření, ale odhadujeme je na základě jednoho měření a vlastností použitého měřidla.

Abychom se vyhnuli zbytečnému zvětšování nejistoty měření během experimentu, elegantně vynecháme nejistotu měření $u(\theta_s)$ úhlu osvětlení θ_s mezi zdrojem záření a osou předmětu tak, že jej nebudeme měřit, nýbrž nastavíme úhel $\theta_s = 0^\circ$.

Dále je výhodné zavést takzvanou relativní nejistotu měření [13], která vyjadřuje poměr mezi stanovenou nejistotou měření a absolutní hodnotou měřené veličiny, vztah vypadá následovně

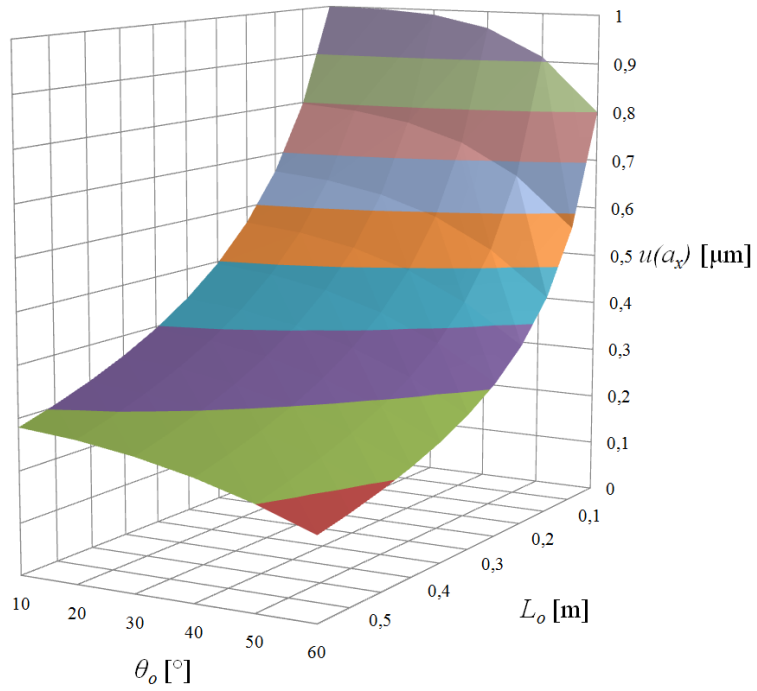
$$u_r(x) = \frac{u(x)}{|x|} \cdot 100\%. \quad (30)$$

Pro potřebu vyjádření relativní nejistoty měření $u_r(a_x)$ translace a_x předmětu zavedeme tvar

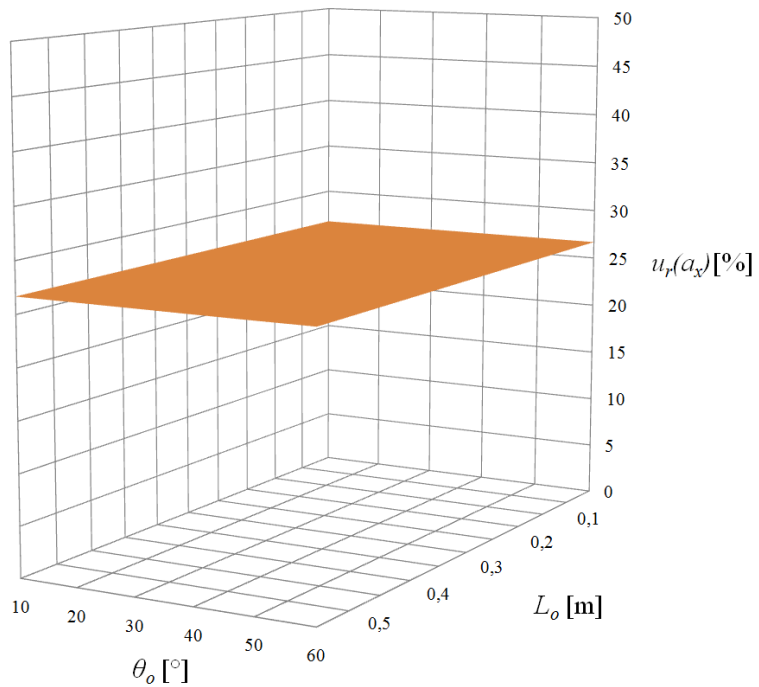
$$u_r(a_x) = \frac{u(a_x)}{|a_x|} \cdot 100\%. \quad (31)$$

Vypočtené absolutní a relativní nejistoty měření složky translace a_x předmětu pro zvolené geometrické nastavení sestavy jsou vyneseny graficky na Obr. 9 - 16. Odpovídající grafy rozlišení byly již uvedeny v předchozí kapitole.

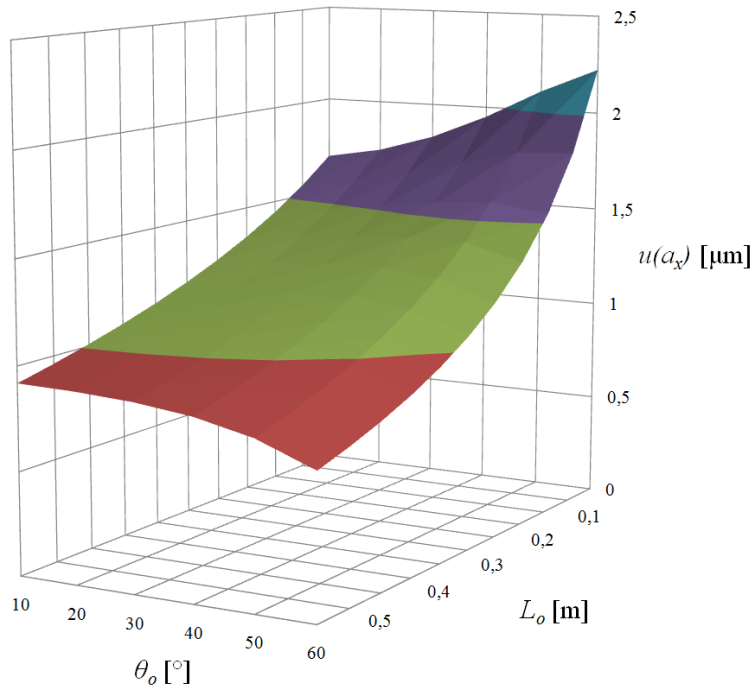
Na Obr. 10, 12 a 14 pozorujeme, že při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 1 px$ (tj. na hranici rozlišitelnosti měření) nabývá relativní nejistota měření $u_r(a_x)$ vyšších hodnot, než při posuvech pole koherenční zrnitosti $A_X > 1 px$. Proto budeme pro praktické realizace měřit posuvy A_X pole koherenční zrnitosti, které jsou větší než 1 pixel. Na Obr. 16 se můžeme přesvědčit, jak se zlepší relativní nejistota $u_r(a_x)$ měření translace a_x předmětu při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 10 px$.



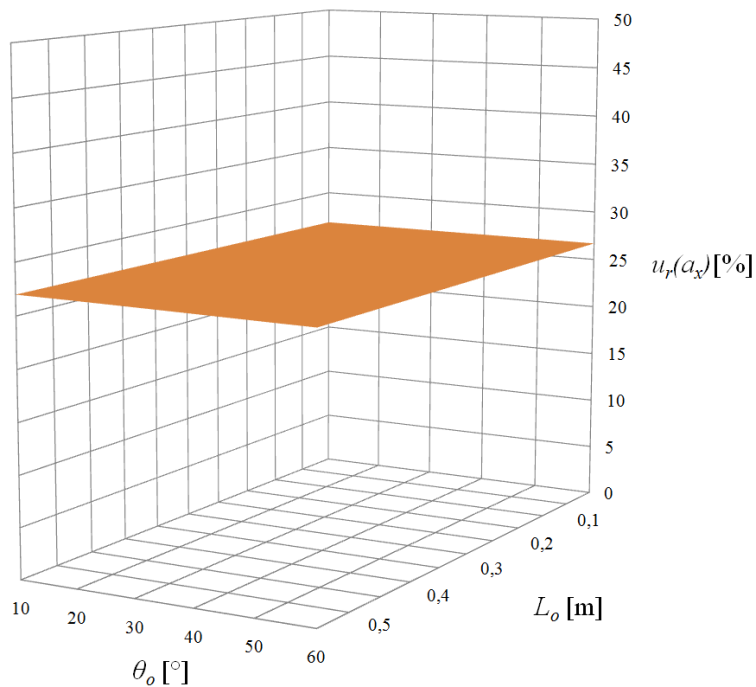
Obr. 9 Nejistota $u(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,1\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



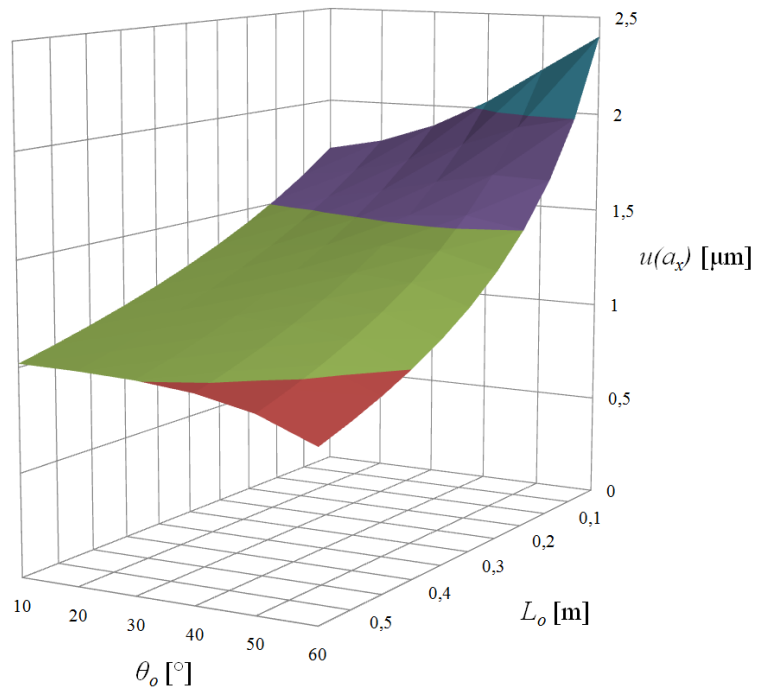
Obr. 10 Relativní nejistota $u_r(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,1\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



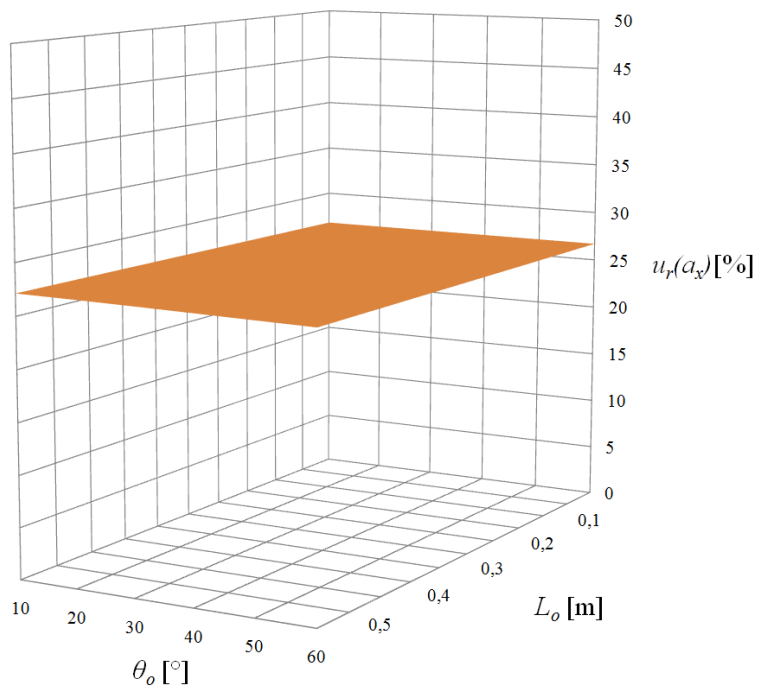
Obr. 11 Nejistota $u(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



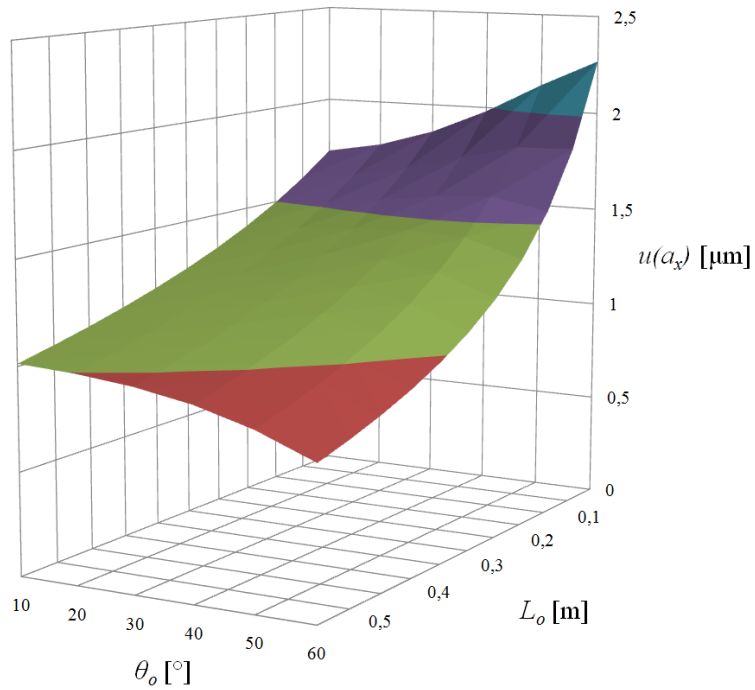
Obr. 12 Relativní nejistota $u_r(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



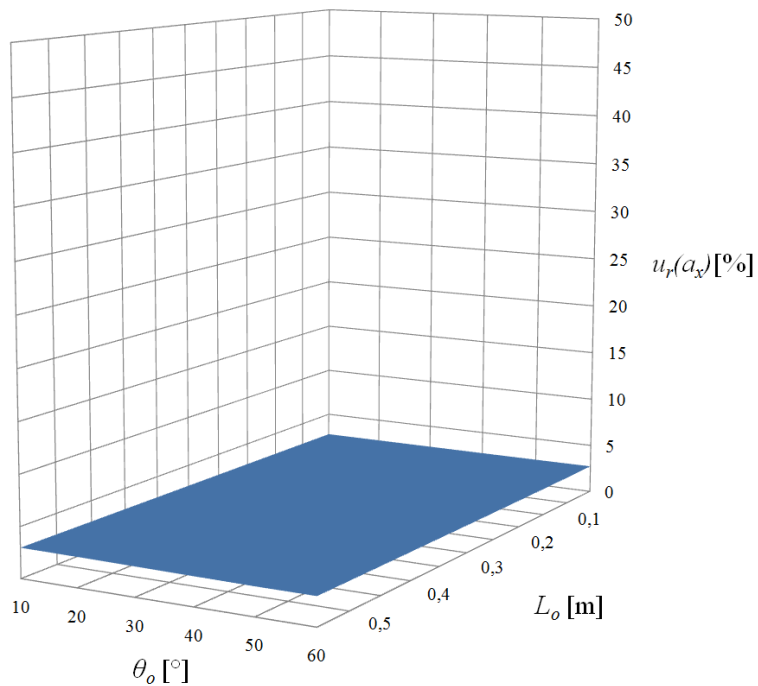
Obr. 13 Nejistota $u(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,6\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



Obr. 14 Relativní nejistota $u_r(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu ve směru souřadné osy x pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,6\text{ m}$, $A_X = 1\text{ px}$)



Obr. 15 Nejistota $u(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 10px$ pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5 m$)



Obr. 16 Relativní $u_r(a_x)$ nejistota měření složky translace a_x předmětu při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 10px$ pro různá geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,5 m$)

2.4 Shrnutí výsledků optimalizace experimentální sestavy

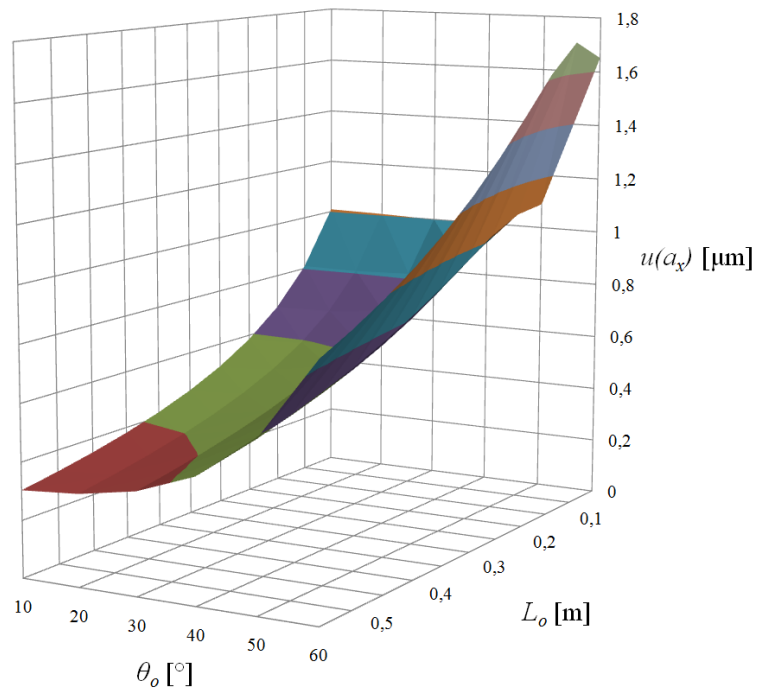
Nyní si shrňme poznatky z předchozích podkapitol a popíšme experimentální sestavu, kterou použijeme pro prezentovaný experiment.

Z Obr. 4 vidíme, že při volbě geometrických parametrů experimentální sestavy $L_s = 0,1 m$, $L_0 = (0,1;0,6) m$, $\theta_0 = (20;60)^\circ$ a posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 1 px$ dosahujeme teoretického rozsahu rozlišení měření složky translace $a_{x\ min} = (0,6;5,3) \mu m$. Přičemž nejmenší hodnotu $a_{x\ min} = 0,6 \mu m$ translace předmětu ve směru souřadné osy x můžeme rozlišit při geometrickém uspořádání sestavy: $L_s = 0,1 m$, $L_0 = 0,6 m$, $\theta_0 = 60^\circ$. Zvyšováním posuvu pole koherenční zrnitosti A_X o 10, respektive 100 pixelů pak dostáváme teoretický rozsah měření pro dané geometrické uspořádání $a_{x\ max} = (6;53) \mu m$, respektive $a_{x\ max} = (60;528) \mu m$ (viz Obr. 8).

Zvyšováním posuvu pole koherenční zrnitosti A_X v pixelech nezvyšujeme pouze rozsah měření, ale také značně snižujeme relativní nejistotu měření. Při posuvu $A_X = 1 px$ pole koherenční zrnitosti dostáváme nejistotu měření $u(a_x)$ translace a_x předmětu pouze o řád menší než je samotná translace a_x předmětu (viz Obr. 4 a 9) a relativní nejistota měření translace a_x předmětu nabývá hodnoty $u_r(a_x) = 26\%$ (viz Obr. 10). Díky tomu, že závislost celkové nejistoty měření $u(a_x)$ na geometrickém uspořádání sestavy je kvalitativně velmi podobná závislosti citlivosti měření translace a_x předmětu na geometrickém uspořádání sestavy, nabývá relativní nejistota měření v celém intervalu $L_s = 0,1 m$, $L_0 = (0,1;0,6) m$, $\theta_0 = (20;60)^\circ$ téměř identické hodnoty. Při větších posuvech pole koherenční zrnitosti, např. $A_X = 10 px$, relativní nejistota měření a_x translace předmětu prudce klesá na hodnotu $u_r(a_x) = 3\%$ (viz Obr. 16).

Pro hodnoty posuvu pole koherenční zrnitosti vyšší než $A_X = 30 px$ se graf nejistoty měření $u(a_x)$ začíná kvalitativně měnit. Změna začíná zlomením grafu při posuvu $A_X = 30 px$ pole koherenční zrnitosti a se zvyšováním hodnoty A_X se graf začíná různě vlnit (viz Obr. 17). Díky tomu, že celková nejistota měření $u(a_x)$ pro takto vysoké hodnoty posuvu A_X pole koherenční zrnitosti je hodně malá oproti samotné hodnotě translace a_x předmětu, nemusíme tomuto "provlnění" grafu závislosti celkové nejistoty měření $u(a_x)$ věnovat velkou pozornost. V těchto případech totiž klesá relativní nejistota $u_r(a_x)$ měření translace a_x předmětu pod 1,6% na celém intervalu $L_s = 0,1 m$, $L_0 = (0,1;0,6) m$, $\theta_0 = (20;60)^\circ$ geometrických parametrů experimentální sestavy.

Vzhledem ke geometrickým rozměrům použitého optického stolu a potřebě provést, co nejcitlivější a nejpresnější měření, zvolíme pro následující experiment tyto parametry experimentální sestavy (dle Obr. 3): $L_s = 0,1 m$, $L_0 = 0,5 m$, $\theta_0 = 22,5^\circ$. Jak se ale dovíme později i tyto parametry jsme ještě museli při opakování experimentu korigovat.



Obr. 17 "Provlnění" grafu nejistoty $u(a_x)$ měření složky translace a_x předmětu při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 100 \text{ px}$ pro geometrická uspořádání experimentální sestavy dle Obr. 3 ($L_s = 0,1 \text{ m}$)

3 Experiment

Po teoretickém rozboru a optimalizaci experimentální sestavy se v této kapitole budeme již věnovat samotnému provedení experimentu využívajícího principu korelace polí koherenční zrnitosti. Vysvětlíme si praktickou realizaci měření a v jednotlivých podkapitolách 3.1 a 3.2 si dále popíšeme použité experimentální sestavy, přičemž dosažené naměřené hodnoty translací předmětu vyneseme do tabulek.

3.1 Měření translace a_x předmětu - Experimentální sestava 1

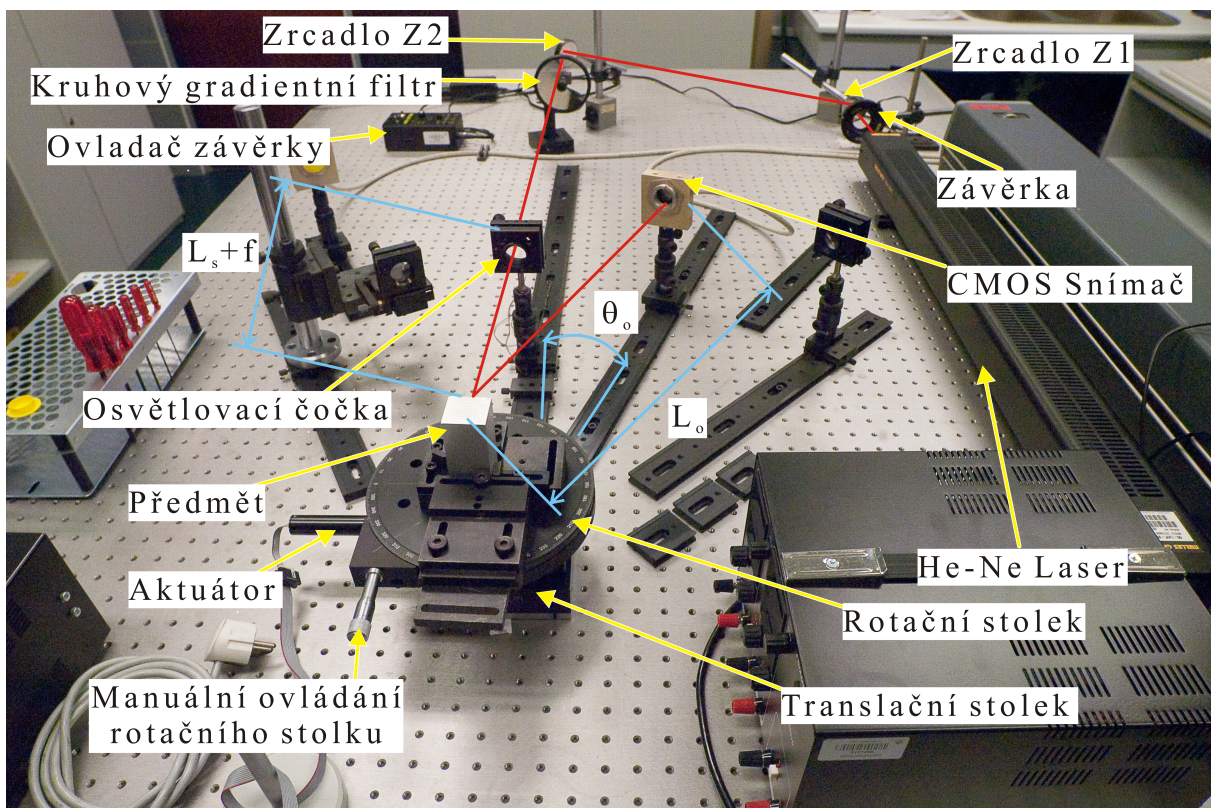
Pro měření translace a_x předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti navrhne experimentální sestavu, jejíž reálný pohled ukazuje Obr. 18 (ve Fotopříloze práce jsou uvedeny další obrázky z experimentu). Geometrické parametry této experimentální sestavy jsou uvedeny v Tab. 2 a jsou zvoleny v souladu s provedenou analýzou citlivosti a přesnosti (viz předchozí kapitola). Připomeňme si význam jednotlivých veličin: vzdálenost senzoru od povrchu předmětu L_o , vzdálenost zdroje záření od povrchu předmětu L_s , úhel pozorování θ_o , úhel osvětlení θ_s , ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky f .

Jelikož je naším cílem měření translace a_x předmětu metodou korelace polí koherenční zrnitosti využitím binární a 8-bitové korelace, provedeme nejprve měření pomocí tradiční 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti. Tím si ověříme, zda-li je experimentální sestava dostatečně přesně postavena a měří v souladu s teorií. Zvolené nastavení geometrických parametrů nám dle provedené teoretické analýzy umožní dosáhnout rozlišení měření translace a_x předmětu již v jednotkách μm na 1 pixel A_X posuvu pole koherenční zrnitosti. Při využití více pixelů CMOS snímače budeme schopni také značně snížit nejistoty měření a dosáhnout přesnějších výsledků. V experimentu provedeme měření translace předmětu pro hodnoty $a_x = 10, 20, 40, 80$ a $150 \mu m$.

Popíšeme si nyní krok za krokem postup měření. K realizaci měření malých translací umístíme zkoumaný předmět (hliníkový kvádr) na automatizovaný translační stolek a mechanický rotační stolek. Rotační stolek nám přitom slouží k přesnému nastavení úhlů směrů osvětlení θ_s a pozorování θ_o . V našem případě jsme již dříve rozhodli zvolit hodnotu $\theta_s = 0^\circ$.

Předmět před translací osvětlíme fokusovaným laserovým svazkem a pomocí CMOS snímače zaznamenáme obraz pole koherenční zrnitosti vzniklého odrazem od drsného povrchu předmětu. V dalším kroku vyšleme příkaz translačnímu stolku, aby vykonal

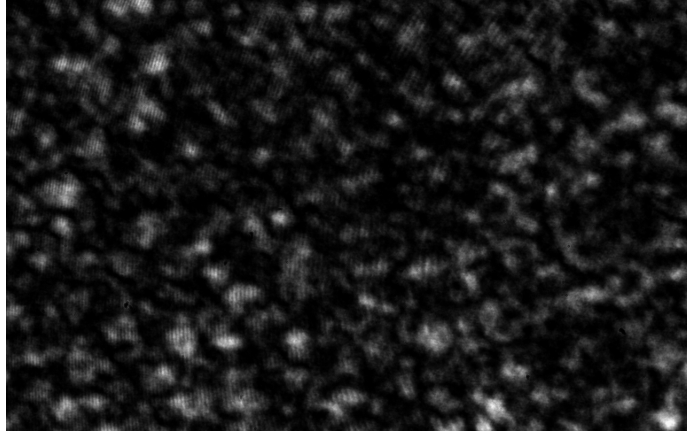
pohyb ve směru souřadné osy x o požadovanou vzdálenost (G-kód pro práci s translačním stolcem je uveden v Příloze D práce). Po této translaci předmětu opět zaznamenáme obraz pole koherenční zrnitosti. Abychom byly schopni tuto intenzitní pole před a po translaci a_x předmětu porovnávat (korelovat), stačí nám použít intenzitní profil řezu pole koherenční zrnitosti v jednom řádku CMOS snímače. Získaná data množiny intenzit jsou poté pomocí korelační metody porovnána a z polohy maxima funkce vzájemné korelace je stanoven posuv A_X pole koherenční zrnitosti v pixelech. Následně je tato hodnota posuvu spolu se zvolenými geometric-
kými parametry experimentální sestavy dosazena do vzorce (22) a je vypočtena velikost translace a_x předmětu v jednotkách μm .



Obr. 18 Reálný pohled na experimentální sestavu

Tab. 2 Nastavení geometrie experimentální sestavy 1

Veličina	Velikost	Jednotka
L_o	0,500	[m]
L_s	0,100	[m]
θ_o	22,5	[°]
θ_s	0	[°]
f	100	[mm]



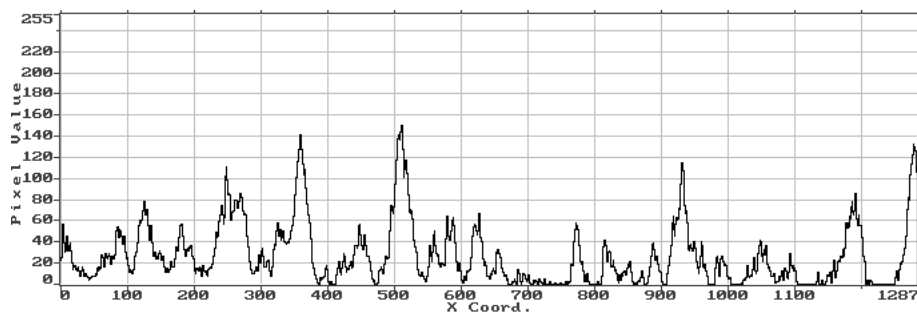
Obr. 19 Rovinný řez polem koherenční zrnitosti zaznamenaný na CMOS detektoru při geometrickém nastavení parametrů dle Tab. 2

Řez polem koherenční zrnitosti zaznamenaný na CMOS snímači při daném geometrickém nastavení experimentální sestavy si můžeme prohlédnout na Obr. 19. Odpovídající intenzitní signál v 8-bitovém režimu z jednoho řádku CMOS snímače pak vidíme na Obr. 20 a 21. Na obrázcích jsou konkrétně znázorněny zaznamenané intenzitní signály před a po translaci $a_x = 40 \mu m$ předmětu. Na této dvojici intenzitních signálů také jasně vidíme účinky dekorelace. To znamená, že signály nejsou vůči sobě pouze posunuty, ale také částečně změněny.

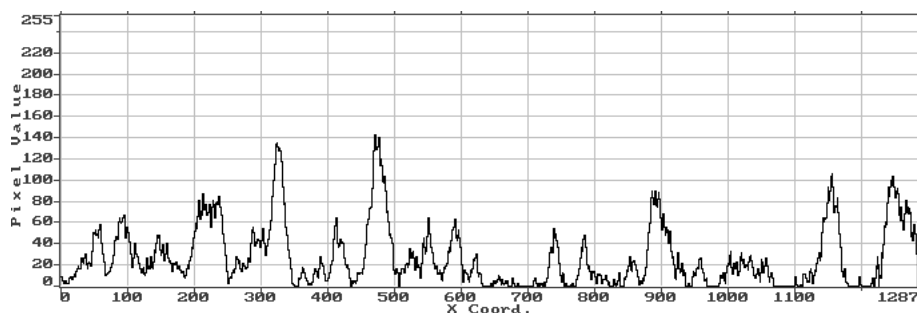
V případě, že chceme použít k detekci posuvu pole koherenční zrnitosti binární korelaci, musíme zaznamenané hodnoty intenzit na CMOS snímači nejprve upravit. K tomu využijeme obslužný software EPIX pro řízení kamery. Pro každý signál vždy určíme střední hodnotu zaznamenané intenzity a hodnotám větším než tato střední hodnota přiřadíme jedničku, ostatním hodnotám pak nulu. Dostaneme tak binární signál (množinu nul a jedniček). Takto upravené signály zaznamenané před translací a po translaci předmětu pak využijeme pro naše výpočty.

Obrázky 22 a 23 ukazují totožnou translaci jako Obr. 20 a 21, ale již v binárním režimu. Tím, že signál má typický obdélníkový průběh, je posuv signálu zřetelný mnohem více. Zdá se, že fluktuace signálu se v binárním režimu projeví méně než v 8-bitovém režimu, proto se Obr. 22 a 23, jeví jakoby intenzitní signály byly skutečně jen posunuty.

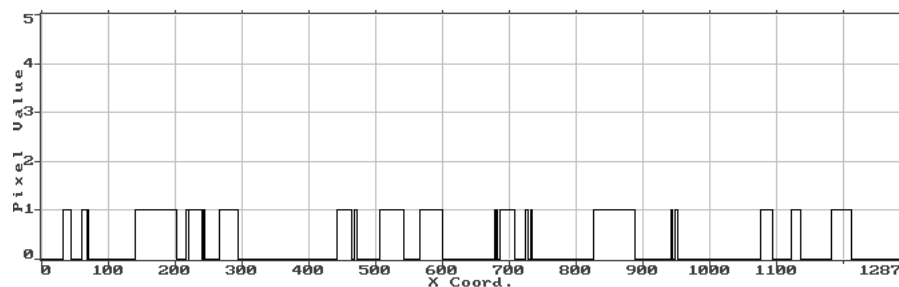
Dosažené výsledky měření translací a_x předmětu jsou uvedeny v Tab. 3-7. Objasňme si význam veličin uvedených v těchto tabulkách: posuv pole koherenční zrnitosti A_X , normovaná funkce vzájemné korelace $r_{1,2}$ intenzit, naměřená translace a_x předmětu, odchylka Δa_x od střední hodnoty a kvadrát této odchylky $(\Delta a_x)^2$. Výsledky jsou uvedeny vždy ve dvojici tabulek. Tabulka a) v dané dvojici prezentuje výsledky dosažené pomocí tradiční 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti, zatímco tabulka b) prezentuje výsledky získané pomocí binární korelace. Každé měření hledané translace předmětu 10x opakujeme.



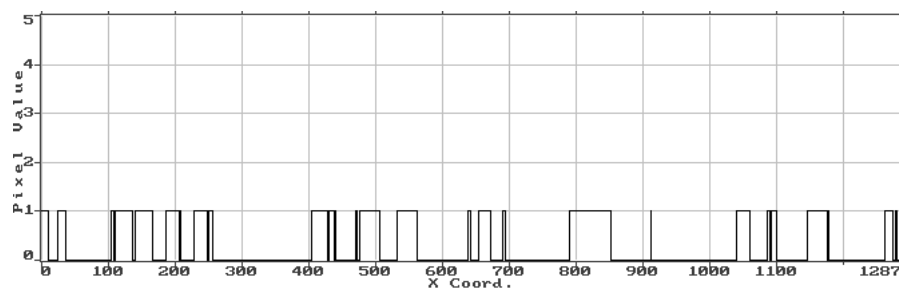
Obr. 20 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače před translací předmětu (8-bitový režim)



Obr. 21 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače po translaci předmětu $a_x = 40 \mu m$ (8-bitový režim)



Obr. 22 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače před translací předmětu (binární režim)



Obr. 23 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače po translaci předmětu $a_x = 40 \mu m$ (binární režim)

Tab. 3a) Výsledky měření translace $a_x = 10 \mu m$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-8	98,2	9,47	-0,71	0,5041
2	-9	98,4	10,65	0,47	0,2209
3	-8	98,8	9,47	-0,71	0,5041
4	-8	98,7	9,47	-0,71	0,5041
5	-9	98,5	10,65	0,47	0,2209
6	-9	98,6	10,65	0,47	0,2209
7	-9	98,6	10,65	0,47	0,2209
8	-9	98,1	10,65	0,47	0,2209
9	-9	98,1	10,65	0,47	0,2209
10	-8	97,8	9,47	-0,71	0,5041
Průměr			10,18		

Tab. 3b) Výsledky měření translace $a_x = 10 \mu m$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-8	88,8	9,47	-0,59	0,3481
2	-8	88,4	9,47	-0,59	0,3481
3	-8	90,6	9,47	-0,59	0,3481
4	-9	88,9	10,65	0,59	0,3481
5	-9	89,6	10,65	0,59	0,3481
6	-8	88,1	9,47	-0,59	0,3481
7	-9	91,1	10,65	0,59	0,3481
8	-9	89,9	10,65	0,59	0,3481
9	-8	89,2	9,47	-0,59	0,3481
10	-9	91,7	10,65	0,59	0,3481
Průměr			10,06		

Tab. 4a) Výsledky měření translace $a_x = 20 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-17	97,3	20,12	-0,36	0,1296
2	-17	96,7	20,12	-0,36	0,1296
3	-17	97,7	20,12	-0,36	0,1296
4	-18	97,3	21,31	0,83	0,6889
5	-17	98,1	20,12	-0,36	0,1296
6	-17	98,0	20,12	-0,36	0,1296
7	-18	96,8	21,31	0,83	0,6889
8	-18	97,6	21,31	0,83	0,6889
9	-17	97,7	20,12	-0,36	0,1296
10	-17	98,0	20,12	-0,36	0,1296
Průměr			20,48		

Tab. 4b) Výsledky měření translace $a_x = 20 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-17	85,7	20,12	-0,12	0,0144
2	-17	84,9	20,12	-0,12	0,0144
3	-17	87,0	20,12	-0,12	0,0144
4	-17	84,1	20,12	-0,12	0,0144
5	-17	89,1	20,12	-0,12	0,0144
6	-17	87,5	20,12	-0,12	0,0144
7	-17	89,6	20,12	-0,12	0,0144
8	-18	88,4	21,31	1,07	1,1449
9	-17	88,5	20,12	-0,12	0,0144
10	-17	88,8	20,12	-0,12	0,0144
Průměr			20,24		

Tab. 5a) Výsledky měření translace $a_x = 40 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-35	96,8	41,43	0,36	0,1296
2	-35	97,1	41,43	0,36	0,1296
3	-35	96,5	41,43	0,36	0,1296
4	-35	96,4	41,43	0,36	0,1296
5	-35	96,5	41,43	0,36	0,1296
6	-34	96,7	40,25	-0,83	0,6889
7	-34	95,9	40,25	-0,83	0,6889
8	-35	96,7	41,43	0,36	0,1296
9	-35	95,7	41,43	0,36	0,1296
10	-34	95,9	40,25	-0,83	0,6889
Průměr			41,08		

Tab. 5b) Výsledky měření translace $a_x = 40 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-34	89,6	40,25	-0,71	0,5041
2	-35	86,9	41,43	0,47	0,2209
3	-35	87,4	41,43	0,47	0,2209
4	-35	90,9	41,43	0,47	0,2209
5	-34	89,8	40,25	-0,71	0,5041
6	-35	87,6	41,43	0,47	0,2209
7	-34	80,2	40,25	-0,71	0,5041
8	-35	82,9	41,43	0,47	0,2209
9	-35	87,2	41,43	0,47	0,2209
10	-34	85,8	40,25	-0,71	0,5041
Průměr			40,96		

Tab. 6a) Výsledky měření translace $a_x = 80 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-70	90,6	82,86	0,71	0,5041
2	-69	95,4	81,68	-0,47	0,2209
3	-69	94,4	81,68	-0,47	0,2209
4	-69	93,9	81,68	-0,47	0,2209
5	-70	94,8	82,86	0,71	0,5041
6	-69	93,8	81,68	-0,47	0,2209
7	-69	94,4	81,68	-0,47	0,2209
8	-70	94,2	82,86	0,71	0,5041
9	-69	94,1	81,68	-0,47	0,2209
10	-70	92,4	82,86	0,71	0,5041
Průměr			82,15		

Tab. 6b) Výsledky měření translace $a_x = 80 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-69	82,1	81,68	-0,59	0,3481
2	-69	82,3	81,68	-0,59	0,3481
3	-69	80,3	81,68	-0,59	0,3481
4	-70	83,8	82,86	0,59	0,3481
5	-69	83,1	81,68	-0,59	0,3481
6	-70	86,1	82,86	0,59	0,3481
7	-70	79,6	82,86	0,59	0,3481
8	-69	78,7	81,68	-0,59	0,3481
9	-70	78,9	82,86	0,59	0,3481
10	-70	80,5	82,86	0,59	0,3481
Průměr			82,27		

Tab. 7a) Výsledky měření translace $a_x = 150 \mu m$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-130	83,0	153,89	0,71	0,5041
2	-129	84,8	152,70	-0,47	0,2209
3	-129	88,6	152,70	-0,47	0,2209
4	-130	90,8	153,89	0,71	0,5041
5	-128	89,9	151,52	-1,66	2,7556
6	-130	89,3	153,89	0,71	0,5041
7	-128	87,5	151,52	-1,66	2,7556
8	-129	89,5	152,70	-0,47	0,2209
9	-131	94,0	155,07	1,89	3,5721
10	-130	94,8	153,89	0,71	0,5041
Průměr			153,18		

Tab. 7b) Výsledky měření translace $a_x = 150 \mu m$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

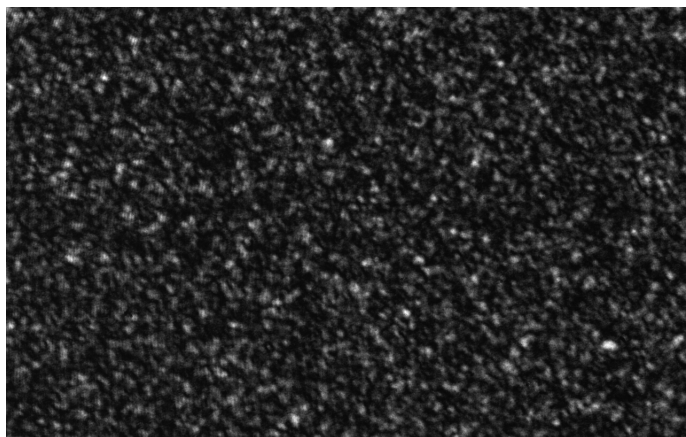
Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-18	17,5	21,31	-39,18	1535,0724
2	51	13,7	60,37	-0,12	0,0144
3	94	19,6	111,27	50,78	2578,6084
4	19	24,5	22,49	-38,00	1444,0000
5	45	14,8	53,27	-7,22	52,1284
6	-39	12,8	42,61	-17,87	319,3369
7	99	20,1	117,19	56,70	3214,8900
8	-51	16,6	60,37	-0,12	0,0144
9	-56	26,5	66,29	5,80	33,6400
10	-42	18,3	49,72	-10,77	115,9929
Průměr			60,49		

3.2 Měření translace a_x předmětu - Experimentální sestava 2

Jelikož jsme v předchozím měření pozorovali jisté zajímavé závislosti, především silný pokles korelace signálů při měření vyšších hodnot translace a_x předmětu pomocí binární korelace, rozhodli jsme se pro realizaci dalšího měření s modifikovaným geometrickým uspořádáním experimentální sestavy. Konkrétně jsme osvětlovací čočku posunuli ze vzdálenosti $L_s = 10\text{ cm}$ do větší vzdálenosti $L_s = 25\text{ cm}$ od zkoumaného předmětu (nové nastavení experimentální sestavy je uvedeno v Tab. 8). V důsledku tohoto posunutí osvětlovací čočky dojde ke snížení citlivosti experimentální sestavy, jak jsme ukázali v kapitole 2, a zároveň ke zmenšení velikosti jednotlivých zrn ve struktuře koherenční zrnitosti. Druhou z těchto skutečností můžeme pozorovat na Obr. 24, který ve srovnání s Obr. 19 ilustruje kvalitativní zmenšení jednotlivých zrn.

Tab. 8 Nastavení geometrie experimentální sestavy 2

Veličina	Velikost	Jednotka
L_o	0,500	[m]
L_s	0,250	[m]
θ_o	22,5	[°]
θ_s	0	[°]
f	100	[mm]



Obr. 24 Řez polem koherenční zrnitosti zaznamenaný na CMOS detektoru při geometrickém nastavení parametrů dle Tab. 8

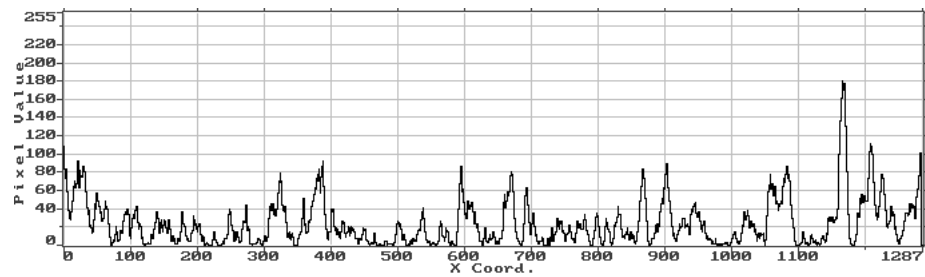
Kvalitativní zmenšení zrn způsobuje zúžení maxim intenzitního signálu zaznamenaných na jednom řádku CMOS snímače. Na Obr. 25 a 26, které zobrazují intenzitní signál před a po translaci $a_x = 40\ \mu\text{m}$ předmětu se o tom můžeme přesvědčit. U binárního signálu dochází ke stejnému efektu. Obrázky 27 a 28 demonstrují značné

zhuštění jedniček v signálech, oproti signálům zaznamenaným pomocí experimentální sestavy 1 (viz Obr. 22 a 23 pro porovnání).

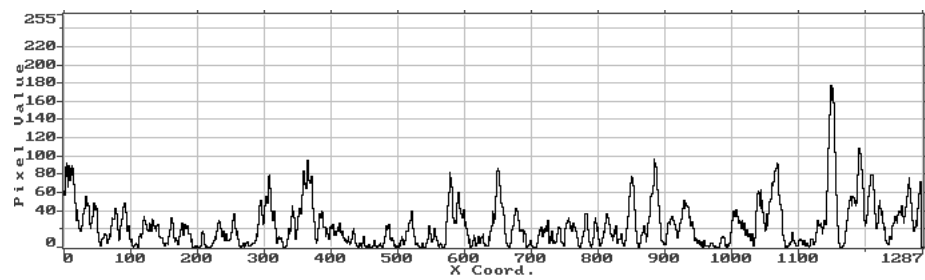
Cílem druhé části experimentu je zjistit, zda-li se pokles binární korelace intenzit, zaznamenaných před a po translaci předmětu, v závislosti na rostoucím posuvu pole koherenční zrnitosti, pozorovaný na experimentální sestavě 1, bude projevovat stejným způsobem i na experimentální sestavě 2.

Pro experimentální sestavu 2 provedeme měření translace předmětu pro hodnoty $a_x = 10, 20, 40, 80, 150, 300$ a $600 \mu m$.

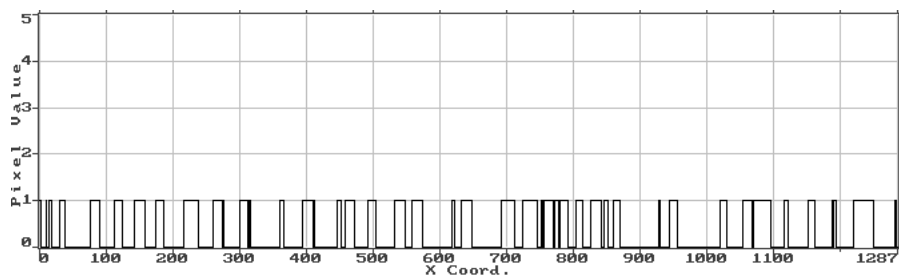
Dosažené výsledky měření translací a_x předmětu jsou shrnuty v Tab. 9-15. Ještě jednou si připomeňme význam veličin uvedených v těchto tabulkách: posuv pole koherenční zrnitosti A_x , normovaná funkce vzájemné korelace $r_{1,2}$ intenzit, translace a_x předmětu, odchylka Δa_x od střední hodnoty a kvadrát této odchylky $(\Delta a_x)^2$. Výsledky opět znázorňuje dvojice tabulek. Tabulka a) v dané dvojici prezentuje výsledky dosažené pomocí tradiční 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti, zatímco tabulka b) prezentuje výsledky získané pomocí binární korelace. Stejně jako v přechozím případě budeme měření hledané translace 10x opakovat.



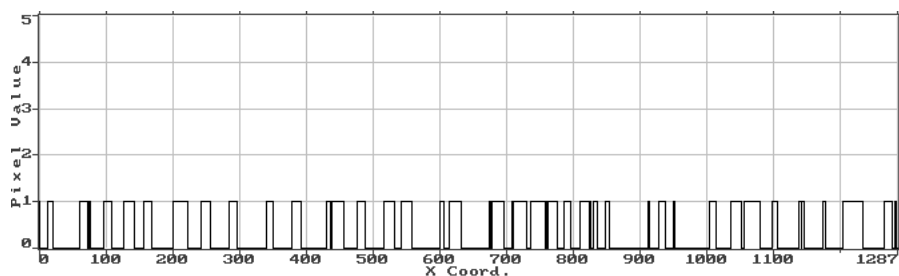
Obr. 25 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače před translací předmětu (8-bitový režim)



Obr. 26 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače po translaci předmětu $a_x = 40 \mu\text{m}$ (8-bitový režim)



Obr. 27 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače před translací předmětu (binární režim)



Obr. 28 Intenzitní záznam řezu pole koherenční zrnitosti z jednoho řádku CMOS snímače po translaci předmětu $a_x = 40 \mu\text{m}$ (binární režim)

Tab. 9a) Výsledky měření translace $a_x = 10 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-4	98,0	9,71	0,00	0,0000
2	-4	98,0	9,71	0,00	0,0000
3	-4	98,1	9,71	0,00	0,0000
4	-4	98,3	9,71	0,00	0,0000
5	-4	98,1	9,71	0,00	0,0000
6	-4	97,9	9,71	0,00	0,0000
7	-4	97,9	9,71	0,00	0,0000
8	-4	97,6	9,71	0,00	0,0000
9	-4	97,4	9,71	0,00	0,0000
10	-4	96,3	9,71	0,00	0,0000
Průměr			9,71		

Tab. 9b) Výsledky měření translace $a_x = 10 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-4	90,9	9,71	0,00	0,0000
2	-4	90,6	9,71	0,00	0,0000
3	-4	90,6	9,71	0,00	0,0000
4	-4	91,7	9,71	0,00	0,0000
5	-4	91,3	9,71	0,00	0,0000
6	-4	90,3	9,71	0,00	0,0000
7	-4	92,0	9,71	0,00	0,0000
8	-4	87,0	9,71	0,00	0,0000
9	-4	89,2	9,71	0,00	0,0000
10	-4	88,1	9,71	0,00	0,0000
Průměr			9,71		

Tab. 10a) Výsledky měření translace $a_x = 20 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-8	97,4	19,43	0,00	0,0000
2	-8	95,9	19,43	0,00	0,0000
3	-8	96,8	19,43	0,00	0,0000
4	-8	97,5	19,43	0,00	0,0000
5	-8	97,9	19,43	0,00	0,0000
6	-8	98,3	19,43	0,00	0,0000
7	-8	98,2	19,43	0,00	0,0000
8	-8	98,1	19,43	0,00	0,0000
9	-8	98,2	19,43	0,00	0,0000
10	-8	98,0	19,43	0,00	0,0000
Průměr			19,43		

Tab. 10b) Výsledky měření translace $a_x = 20 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-8	84,9	19,43	0,00	0,0000
2	-8	88,6	19,43	0,00	0,0000
3	-8	88,0	19,43	0,00	0,0000
4	-8	87,8	19,43	0,00	0,0000
5	-8	88,9	19,43	0,00	0,0000
6	-8	90,1	19,43	0,00	0,0000
7	-8	90,7	19,43	0,00	0,0000
8	-8	88,0	19,43	0,00	0,0000
9	-8	90,0	19,43	0,00	0,0000
10	-8	87,1	19,43	0,00	0,0000
Průměr			19,43		

Tab. 11a) Výsledky měření translace $a_x = 40 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-16	97,3	38,85	-1,21	1,4641
2	-16	97,4	38,85	-1,21	1,4641
3	-16	97,6	38,85	-1,21	1,4641
4	-17	97,5	41,28	1,21	1,4641
5	-17	97,6	41,28	1,21	1,4641
6	-16	96,5	38,85	-1,21	1,4641
7	-17	97,5	41,28	1,21	1,4641
8	-17	97,1	41,28	1,21	1,4641
9	-16	97,6	38,85	-1,21	1,4641
10	-17	97,0	41,28	1,21	1,4641
Průměr			40,07		

Tab. 11b) Výsledky měření translace $a_x = 40 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-17	87,9	41,28	0,97	0,9409
2	-16	91,7	38,85	-1,46	2,1316
3	-16	90,4	38,85	-1,46	2,1316
4	-17	89,5	41,28	0,97	0,9409
5	-17	89,1	41,28	0,97	0,9409
6	-17	89,4	41,28	0,97	0,9409
7	-16	86,1	38,58	-1,46	2,1316
8	-17	87,4	41,28	0,97	0,9409
9	-16	88,3	38,85	-1,46	2,1316
10	-17	85,6	41,28	0,97	0,9409
Průměr			40,31		

Tab. 12a) Výsledky měření translace $a_x = 80 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-33	95,1	80,13	-0,24	0,0576
2	-33	96,0	80,13	-0,24	0,0576
3	-34	96,6	82,56	2,19	4,7961
4	-33	97,2	80,13	-0,24	0,0576
5	-33	96,2	80,13	-0,24	0,0576
6	-33	97,0	80,13	-0,24	0,0576
7	-33	97,1	80,13	-0,24	0,0576
8	-32	96,0	77,70	-2,67	7,1289
9	-34	95,1	82,56	2,19	4,7961
10	-33	96,5	80,13	-0,24	0,0576
Průměr			80,37		

Tab. 12b) Výsledky měření translace $a_x = 80 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-33	83,8	80,13	0,00	0,0000
2	-33	84,8	80,13	0,00	0,0000
3	-34	85,7	82,56	2,43	5,9049
4	-33	88,2	80,13	0,00	0,0000
5	-33	86,7	80,13	0,00	0,0000
6	-33	87,2	80,13	0,00	0,0000
7	-33	90,3	80,13	0,00	0,0000
8	-32	85,6	77,70	-2,43	5,9049
9	-33	84,6	80,13	0,00	0,0000
10	-33	86,5	80,13	0,00	0,0000
Průměr			80,13		

Tab. 13a) Výsledky měření translace $a_x = 150 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-62	95,0	150,55	0,97	0,9409
2	-62	92,8	150,55	0,97	0,9409
3	-61	92,6	148,12	-1,46	2,1316
4	-62	92,0	150,55	0,97	0,9409
5	-62	90,0	150,55	0,97	0,9409
6	-62	90,0	150,55	0,97	0,9409
7	-61	89,3	148,12	-1,46	2,1316
8	-62	90,9	150,55	0,97	0,9409
9	-61	90,6	148,12	-1,46	2,1316
10	-61	89,8	148,12	-1,46	2,1316
Průměr			149,58		

Tab. 13b) Výsledky měření translace $a_x = 150 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-62	85,0	150,55	0,49	0,2401
2	-62	80,8	150,55	0,49	0,2401
3	-61	80,8	148,12	-1,94	3,7636
4	-63	76,9	152,98	2,91	8,4681
5	-61	75,1	148,12	-1,94	3,7636
6	-62	77,5	150,55	0,49	0,2401
7	-62	72,3	150,55	0,49	0,2401
8	-62	75,2	150,55	0,49	0,2401
9	-62	74,9	150,55	0,49	0,2401
10	-61	75,8	148,12	-1,94	3,7636
Průměr			150,06		

Tab. 14a) Výsledky měření translace $a_x = 300 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-123	75,5	298,67	-1,21	1,4641
2	-125	78,1	303,53	3,64	13,2496
3	-123	78,1	298,67	-1,21	1,4641
4	-123	78,1	298,67	-1,21	1,4641
5	-123	80,3	298,67	-1,21	1,4641
6	-124	75,7	301,10	1,21	1,4641
7	-124	83,1	301,10	1,21	1,4641
8	-124	82,0	301,10	1,21	1,4641
9	-123	83,3	298,67	-1,21	1,4641
10	-123	86,7	298,67	-1,21	1,4641
Průměr			299,89		

Tab. 14b) Výsledky měření translace $a_x = 300 \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-124	60,5	301,10	1,21	1,4641
2	-123	63,9	298,67	-1,21	1,4641
3	-122	60,4	296,24	-3,64	13,2496
4	-124	60,5	301,10	1,21	1,4641
5	-123	61,2	298,67	-1,21	1,4641
6	-124	58,4	301,10	1,21	1,4641
7	-124	60,7	301,10	1,21	1,4641
8	-124	65,1	301,10	1,21	1,4641
9	-124	62,0	301,10	1,21	1,4641
10	-123	63,5	298,67	-1,21	1,4641
Průměr			299,89		

Tab. 15a) Výsledky měření translace $a_x=600\ \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí 8-bitové korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-247	62,8	599,77	-1,21	1,4641
2	-248	45,9	602,20	1,21	1,4641
3	-248	60,1	602,20	1,21	1,4641
4	-247	63,3	599,77	-1,21	1,4641
5	-247	60,5	599,77	-1,21	1,4641
6	-248	52,8	602,20	1,21	1,4641
7	-248	61,4	602,20	1,21	1,4641
8	-247	67,9	599,77	-1,21	1,4641
9	-248	46,6	602,20	1,21	1,4641
10	-247	62,4	599,77	-1,21	1,4641
Průměr			600,99		

Tab. 15b) Výsledky měření translace $a_x = 600\ \mu\text{m}$ předmětu ve směru souřadné osy x pomocí binární korelace polí koherenční zrnitosti

Měření č.	A_X [px]	$r_{1,2}$ [%]	a_x [μm]	Δa_x [μm]	$(\Delta a_x)^2$ [μm^2]
1	-241	40,3	585,20	-14,81	219,3361
2	-248	31,3	602,20	2,19	4,7961
3	-248	41,0	602,20	2,19	4,7961
4	-247	38,3	599,77	-0,24	0,0576
5	-248	35,3	602,20	2,19	4,7961
6	-247	41,1	599,77	-0,24	0,0576
7	-249	43,4	604,63	4,61	21,2521
8	-248	45,0	602,20	2,19	4,7961
9	-248	34,0	602,20	2,19	4,7961
10	-247	34,2	599,77	-0,24	0,0576
Průměr			600,02		

4 Vyhodnocení experimentálně získaných dat

V poslední kapitole shrneme výsledky měření translace a_x předmětu dosažené pomocí běžně používané 8-bitové a v prezentovaném experimentu zkoušené binární korelace polí koherenční zrnitosti. Získané velikosti translace a_x předmětu z jednotlivých opakovaných měření jsou zprůměrovány a uvedeny v tabulkách, ve kterých jsou potom porovnány tyto dva typy korelací. Výsledky jsou diskutovány, jak z kvantitativního, tak kvalitativního hlediska. Dále jsou srovnány průměrné velikosti dosažených korelací $\overline{r_{1,2}}$ a analyzována opakovatelnost jednotlivých měření translace a_x předmětu.

4.1 Kvantitativní vyhodnocení výsledků

Pro objektivní posouzení dosažených výsledků měření si porovnáme některé důležité veličiny stanovené pomocí 8-bitové a binární korelace. Tyto veličiny jsou: průměrný posuv pole koherenční zrnitosti $\overline{A_X}$, průměrná translace $\overline{a_x}$ předmětu, průměrná nejistota měření $\overline{u(a_x)}$, průměrná velikost dosažené korelace $\overline{r_{1,2}}$ intenzit, směrodatná odchylka $\sigma_{\overline{a_x}}$ průměru naměřené translace a_x předmětu (reprezentující opakovatelnost měření souboru 10 translací a_x předmětu) a směrodatná odchylka σ_{a_x} jednoho měření translace a_x předmětu (reprezentující opakovatelnost jednoho měření translace a_x předmětu). Výsledky jednotlivých měření pro experimentální sestavy 1 a 2 si můžeme prohlédnout v Tab. 16 a 17.

Tab. 16 Porovnání výsledků měření translace a_x předmětu 8-bitovou a binární korelací
(Experimentální sestava 1)

Translace a_x předmětu	Veličina	8-bitová korelace	Binární korelace
10 μm	$\overline{A_X}$ [px]	9	9
	$\overline{a_x}$ [μm]	10, 2	10, 1
	$\overline{u(a_x)}$ [μm]	0, 3	0, 3
	$\overline{r_{1,2}}$ [%]	98,4	89,6
	$\sigma \overline{a_x}$ [μm]	0,2	0,2
	σa_x [μm]	0,6	0,6
	20 μm	$\overline{A_X}$ [px]	17
$\overline{a_x}$ [μm]		20, 5	20, 2
$\overline{u(a_x)}$ [μm]		0, 3	0, 3
$\overline{r_{1,2}}$ [%]		97,5	87,4
$\sigma \overline{a_x}$ [μm]		0,2	0,1
σa_x [μm]		0,6	0,4
40 μm		$\overline{A_X}$ [px]	35
	$\overline{a_x}$ [μm]	41, 1	41, 0
	$\overline{u(a_x)}$ [μm]	0, 4	0, 4
	$\overline{r_{1,2}}$ [%]	96,4	86,8
	$\sigma \overline{a_x}$ [μm]	0,2	0,2
	σa_x [μm]	0,6	0,6
	80 μm	$\overline{A_X}$ [px]	69
$\overline{a_x}$ [μm]		82, 2	82, 3
$\overline{u(a_x)}$ [μm]		0, 4	0, 4
$\overline{r_{1,2}}$ [%]		93,8	81,5
$\sigma \overline{a_x}$ [μm]		0,2	0,2
σa_x [μm]		0,6	0,6
150 μm		$\overline{A_X}$ [px]	129
	$\overline{a_x}$ [μm]	153, 2	...
	$\overline{u(a_x)}$ [μm]	0, 4	...
	$\overline{r_{1,2}}$ [%]	89,2	18,4
	$\sigma \overline{a_x}$ [μm]	0,4	...
	σa_x [μm]	1,1	...

Tab. 17 Porovnání výsledků měření translace a_x předmětu 8-bitovou a binární korelací
(Experimentální sestava 2)

Translace a_x předmětu	Veličina	8-bitová korelace	Binární korelace
10 μm	$\overline{A_X}$ [px]	4	4
	$\overline{a_x}$ [μm]	9,7	9,7
	$\overline{u(a_x)}$ [μm]	0,7	0,7
	$\overline{r_{1,2}}$ [%]	97,8	90,2
	$\sigma \overline{a_x}$ [μm]	0,0	0,0
	σa_x [μm]	0,0	0,0
	20 μm	$\overline{A_X}$ [px]	8
$\overline{a_x}$ [μm]		19,4	19,4
$\overline{u(a_x)}$ [μm]		0,7	0,7
$\overline{r_{1,2}}$ [%]		97,6	88,4
$\sigma \overline{a_x}$ [μm]		0,0	0,0
σa_x [μm]		0,0	0,0
40 μm		$\overline{A_X}$ [px]	17
	$\overline{a_x}$ [μm]	40,1	40,3
	$\overline{u(a_x)}$ [μm]	0,7	0,7
	$\overline{r_{1,2}}$ [%]	97,3	88,54
	$\sigma \overline{a_x}$ [μm]	0,4	0,4
	σa_x [μm]	1,3	1,3
	80 μm	$\overline{A_X}$ [px]	33
$\overline{a_x}$ [μm]		80,4	80,1
$\overline{u(a_x)}$ [μm]		0,8	0,8
$\overline{r_{1,2}}$ [%]		96,3	86,3
$\sigma \overline{a_x}$ [μm]		0,4	0,4
σa_x [μm]		1,4	1,1

Translace a_x předmětu	Veličina	8-bitová korelace	Binární korelace
$150 \mu m$	$\overline{A_X} [px]$	62	62
	$\overline{a_x} [\mu m]$	149,6	150,1
	$\overline{u(a_x)} [\mu m]$	0,8	0,8
	$\overline{r_{1,2}} [\%]$	91,3	77,4
	$\sigma \overline{a_x} [\mu m]$	0,4	0,5
	$\sigma a_x [\mu m]$	1,3	1,5
$300 \mu m$	$\overline{A_X} [px]$	124	124
	$\overline{a_x} [\mu m]$	299,9	299,9
	$\overline{u(a_x)} [\mu m]$	0,9	0,9
	$\overline{r_{1,2}} [\%]$	80,1	61,6
	$\sigma \overline{a_x} [\mu m]$	0,5	0,5
	$\sigma a_x [\mu m]$	1,7	1,7
$600 \mu m$	$\overline{A_X} [px]$	248	247
	$\overline{a_x} [\mu m]$	601	600
	$\overline{u(a_x)} [\mu m]$	1	1
	$\overline{r_{1,2}} [\%]$	58,4	38,4
	$\sigma \overline{a_x} [\mu m]$	0,4	2
	$\sigma a_x [\mu m]$	1,3	5

4.2 Kvalitativní vyhodnocení výsledků

Porovnáním výsledků jednotlivých měření z Tab. 16 pro experimentální sestavu 1 si můžeme povšimnout, že se zvyšující se velikostí translace a_x předmětu, se snižuje korelace $\overline{r_{1,2}}$ - podobnost zkoumaných signálů. Jestliže je posuv pole koherenční zrnitosti již tak velký, dochází k dekorelaci signálů a korelační metoda není schopna nalézt podobnost intenzitních signálů řezu tohoto pole, popřípadě jen velmi malou. Tato skutečnost je provázána tím, že čím větší je požadovaná translace nastavená na translačním stolku, tím více se projeví zvětšení naměřené hodnoty velikosti translace a_x předmětu oproti hodnotě nastavené na translačním stolku. V Tab. 16 se můžeme přesvědčit, že korelační software vždy určí hodnotu translace větší, než je skutečná, nikdy ne menší. To platí, jak pro 8-bitovou, tak pro binární korelaci.

Zvláštností oproti 8-bitové korelaci je fakt, že při měření translace $a_x = 150 \mu m$ pomocí binární korelace je podobnost signálů již tak malá, že korelační metoda není schopna provést přesné měření. Požadovaná informace se ztrácí v šumu a výsledek se ani řádově nepodobá reálné velikosti translace.

Pokud se zaměříme na porovnávání typu korelace v rámci měření jedné translace a_x předmětu, tak můžeme říci, že výsledky jsou téměř ve všech případech srovnatelné. Poněkud mimo oblast ekvivalence jsou měření $a_x = 10 \mu m$ a $a_x = 150 \mu m$. To znamená dolní a horní hranice intervalu měření translace a_x . Na spodní hranici tohoto intervalu vidíme, že výsledek získaný pomocí binární korelace je nepatrně přesnější. Vzhledem k malému počtu opakování měření takto nízkých hodnot translace a_x předmětu nemůžeme tento poznatek prohlásit za obecně platný. Naopak na horní hranici intervalu se ukazuje, že binární korelace je naprosto nepoužitelná. Dokonce se nedá využít ani jako pouhý odhad, neboť korelace jednotlivých intenzitních signálů je již velmi malá.

V rámci druhé části experimentu (experimentální sestava 2), kdy jsme se snažili ověřit pozorované závislosti na jiné experimentální sestavě, došlo k naměření velmi podobných výsledků. Překvapující je, že přestože jsme v rámci teorie snížili citlivost měření, výsledek měření $a_x = 10 \mu m$ se nijak zásadně neliší od předchozího (naměřeného na experimentální sestavě 1), ovšem nejistota měření je vyšší. Dále bylo možné provést měření i daleko větších translací. Ačkoli při translaci $a_x = 600 \mu m$ pozorujeme značně sníženou korelaci intenzitních signálů, dopadlo toto měření mnohem lépe než při translaci $a_x = 150 \mu m$ na více citlivé sestavě. Z toho vyplývá, že nastavením geometrie experimentální sestavy pro vyšší citlivost získáváme mnohem menší rozsah naměřitelných hodnot translace a_x předmětu. Při vyšší citlivosti se totiž zaznamenané řezy pole koherenční zrnitosti posouvají mnohem více a tudíž dochází k dekorelaci. U binární korelace je pokles průměrné hodnoty korelace patrný mnohem více, než u 8-bitové.

Dále lze vidět, že měření neovlivňují pouze geometrické parametry sestavy, ale také velikost zrn, potažmo tvar maxim intenzitního signálu, které snímáme na CMOS kameře. Pokud chceme dosáhnout co nejlepších výsledků v rámci binární korelace, je tedy lepší volit zrno kvalitativně spíše menší (srovnej Obr. 19 a 24), kdy dostáváme užší maxima v intenzitním signálu.

Závěr

Cílem prezentované bakalářské práce bylo ukázat, zda-li je metoda korelace polí koherenční zrnitosti pro měření translace zkoumaného předmětu použitelná, pro binární i tradiční 8-bitovou korelaci, či nikoliv.

Přínosem binární korelace by mohlo být např. urychlení výpočtů experimentálních výsledků, nebo možnost sestavit binární korelátor jako samostatnou součástku - integrovaný obvod měřicího senzoru. Neméně důležitou výhodou měření pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti je také bezkontaktnost, která v kombinaci s binárním korelátorem urychlující výpočty může být u některých experimentů naprosto rozhodujícím činitelem pro volbu této metody měření.

Jak jsme si v podkapitole 4.2 uvedli, binární korelace je za jistých podmínek naprosto ekvivalentní ke korelaci 8-bitové. Těmito podmínkami máme na mysli buď měření velmi malých translací předmětu - jednotky až desítky mikrometrů, kdy dochází k vysoké korelaci mezi zaznamenanými intenzitními signály (při volbě geometrických parametrů umožňujících vyšší citlivost měření, viz nastavení experimentální sestavy 1 v Tab. 2), nebo kvalitativně menší zrno pro dosažení stejně přesných výsledků i při měření větších translací předmětu - desítky až stovky mikrometrů (při volbě geometrických parametrů umožňujících větší rozsah měření, viz nastavení experimentální sestavy 2 v Tab. 8).

Ve všech ostatních případech je třeba nastavením geometrie experimentální sestavy zajistit, aby se posuv pole koherenční zrnitosti odehrál na velice malé části CMOS snímače. Tím dosáhneme toho, že intenzitní signály se od sebe liší jen velmi málo a korelační metoda je schopna stále najít jejich podobnost.

Pochopitelně můžeme využít většího počtu pixelů, ale korelace jednotlivých signálů bude klesat. Experimentem jsme se přesvědčili, že ještě při posuvu pole koherenční zrnitosti $A_X = 250 px$ je korelace intenzitních signálů na takové úrovni a směrodatné odchylky jednoho i celého souboru měření dostatečně malé⁸, aby se toto měření dalo považovat za přesné. Ovšem za využití geometrického nastavení parametrů experimentální sestavy, které produkovalo kvalitativně menší velikost zrn. Při původním nastavení, jako v první části experimentu, bychom nebyli schopni zaznamenat tak přesná měření.

Jinými slovy musíme dopředu vědět, jak velké translace a_x předmětu chceme měřit, poněvadž požadavky vysoké citlivosti měření a velkého rozsahu měření jsou v kontradikci.

Otázkou pro další výzkum nadále zůstává, jaká je ideální velikost zrn ve struktuře koherenční zrnitosti pro malé translace a jaká naopak pro translace větší.

⁸Menší než 5%.

Seznam použité literatury

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_(physics))
- [2] MALÝ, P.: Optika. Nakladatelství Karolinum, Praha, 2008.
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [4] YAMAGUCHI, I.: Fundamentals and applications of speckle. In *Speckle Metrology 2003*, Gasteringer, K., Lokberg, O.J., Winther, S., eds., *Proc. SPIE*, **4933**, pp. 1-8, 2003.
- [5] DAINTY, J.C. (editor): Laser Speckle and Related Phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Speckle>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Active_pixel_sensor
- [9] <http://ericfossum.com/Presentations/Presentations.htm>
- [10] HRABOVSKÝ, M., BAČA, Z., HORVÁTH, P.: Koherenční zrnitost v optice. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2001.
- [11] GOODMAN, J. W.: Speckle phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts & Company, Englewood, 2007.
- [12] HORVÁTH, P., HRABOVSKÝ, M., ŠMÍD, P.: Application of speckle decorrelation method for small translation measurements. *Opt. Appl.* **34**(2), pp. 203-218, 2004.
- [13] MLČOCH J.: Úvod do fyzikálního měření. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2001.
- [14] ČSN 010115: Názvosloví v metrologii
- [15] RABINOVICH, S. G.: Measurement errors and uncertainties. (2nd Edition) Springer – Verlag, New York, 2000.
- [16] EA 4/02: Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. Český normalizační institut, Praha, 2001.

Přehled použitých zkratk

Zkratka (Anglický název)	Český název (Poznámka)
ADC (Analog to digital converter)	Analogově digitální převodník
APS (Active pixel sensor)	Sensor s aktivními pixely
CCD (Charge coupled device)	Zařízení s vázaným nábojem (snímací prvek)
CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)	Komplementární struktura MOS (snímací prvek)
CNC (Computer numerical controlled)	Číslicové řízení pomocí počítače
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)	Zesilování světla stimulovanou emisí záření (zdroj elmag. záření)
Pixel (Picture element)	Obrazový prvek
PID (Proportional-integral-derivative controller)	PID regulátor (Spojitý regulátor složený z proporcionální, integrační a derivační části)
NC (Numerical control)	Číslicové ovládání (zejména obráběcích strojů)

Přehled použitých konstant, fyzikálních veličin, jejich rozměrů a jednotek

Značka	Název	Jednotka	Rozměr
τ_0	Koherenční čas/doba	s	s
$\Delta\nu$	Spektrální šířka záření	Hz	s^{-1}
l_c	Koherenční délka/dráha	m	m
c	Rychlost světla	$\frac{m}{s}$	299 792 458
λ	Vlnová délka	m	m
$\Delta\lambda$	Spektrální šířka zdroje záření	m	m
I	Intenzita zdroje záření	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{kg}{s^3}$
$\Delta\varphi$	Fázové posunutí intenzit	rad	rad
V	Visibilita/kontrast interferenčních proužků	-	bezrozměrný
I_{max}	Maximální intenzita	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{kg}{s^3}$
I_{min}	Minimální intenzita	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{kg}{s^3}$
$ \tilde{\gamma}_{12}(\tau) $	Stupeň koherence	-	bezrozměrný
θ	Úhel mezi paprsky	rad	rad
s, l, r	Různá označení pro lineární vzdálenosti	m	m
l_s	Koherenční šířka	m	m
ν_{21}	Frekvence	Hz	s^{-1}
E_1, E_2	Různé hodnoty energie	J	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
h	Planckova konstanta	$\frac{J}{s}$	$6,626 \cdot 10^{-34}$
A_X	Posuv pole KZ ve směru souřadné osy X	px	m
A_Y	Posuv pole KZ ve směru souřadné osy Y	px	m
a_x	Translace předmětu ve směru souřadné osy x	m	m
a_y	Translace předmětu ve směru souřadné osy y	m	m
a_z	Translace předmětu ve směru souřadné osy z	m	m
L_s	Vzdálenost bodového zdroje od předmětu	m	m
L_o	Vzdálenost předmětu od snímače	m	m
θ_s	Úhel osvětlení (s - source)	rad	rad
θ_o	Úhel pozorování (o - observer)	rad	rad
$f(x), g(x)$	Různé funkční hodnoty	různé	různé
Δx	Obecné posunutí ve směru souřadné osy x	různé	různé
$u(a_x)$	Nejistota měření translace a_x	m	m
$u_B(A_x)$	Nejistota měření typu B veličiny A_X	px	m
$u_B(L_o)$	Nejistota měření typu B veličiny L_o	m	m
$u_B(L_s)$	Nejistota měření typu B veličiny L_s	m	m
$u_B(\theta_o)$	Nejistota měření typu B veličiny θ_o	rad	rad

Značka	Název	Jednotka	Rozměr
$u_B(\theta_s)$	Nejistota měření typu B veličiny θ_s	<i>rad</i>	<i>rad</i>
χ	Koeficient rozdělení	-	bezrozměrný
$u_r(a_x)$	Relativní nejistota měření translace a_x	-	%
f	Ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky	<i>m</i>	<i>m</i>
$r_{1,2}$	Normovaná funkce vzájemné korelace	-	%
Δa_x	Odchyłka od střední hodnoty naměřené translace a_x předmětu	<i>m</i>	<i>m</i>
$\overline{A_X}$	Průměrný posuv pole koherenční zrnitosti ve směru souřadné osy X	<i>px</i>	<i>m</i>
$\overline{a_x}$	Průměrná hodnota translace předmětu ve směru souřadné osy x	<i>m</i>	<i>m</i>
$\overline{r_{1,2}}$	Průměrná velikost dosažené korelace intenzitních signálů	-	%
$\sigma \overline{a_x}$	Směrodatná odchyłka průměru velikosti naměřené translace a_x předmětu	<i>m</i>	<i>m</i>
σa_x	Směrodatná odchyłka jednoho měření translace a_x předmětu	<i>m</i>	<i>m</i>

Přílohy

A: Technická data použitého laseru

- Introduction to Lasers
- Diode-Pumped Solid State Lasers
- Ion and Helium Cadmium Lasers
- Helium Neon Lasers
- Diode Laser Assemblies
- Laboratory Diode Laser Drivers
- Laser Accessories



Available in:
 ✓ Production Quantities
 ✓ Custom Configurations

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: $\pm 2\%/hr$

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

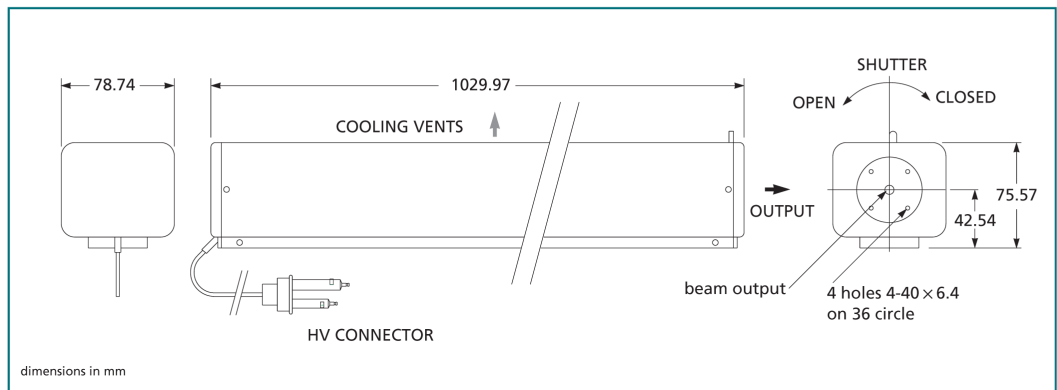
General Specifications:
 Temperature:
 Operating: -20°C to $+40^\circ\text{C}$
 Nonoperating: -40°C to $+80^\circ\text{C}$
 Altitude:
 Operating: 0–3000 m,
 Nonoperating: 0–5800 m
 Humidity:
 Operating: 0–90%
 Nonoperating: 0–100%
 Shock: 25 g for 11 msec
 Safety Certification: CDRH Class IIIb, IEC Class 3B

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

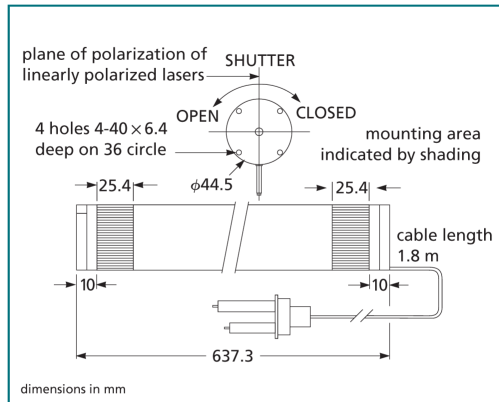
High-Power Helium Neon Laser Systems

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

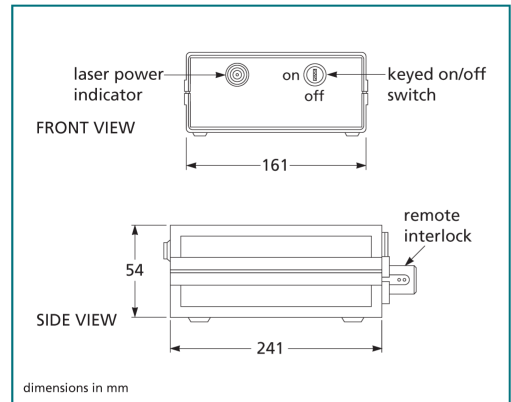
*Add the appropriate suffix to the product number to indicate input voltage: -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac, or -461 for 100 Vac.



25 LHP 828 and 928 high-power helium neon laser head



25 LHR/P 925 high-power helium neon laser head



High-power helium neon laser power supply

B: Technická data řídicí karty

Encoder Drivers

computer logic which is used for controlling and communicating with the individual modules.

A key feature of the Encoder Driver Card is its ability to automatically determine what modules are present. This results in easy system configuration, simply install whatever modules the application calls for. The logic on the mother board will adjust its operation accordingly.

The Encoder Driver Card can also be mounted outside of a PC, with power supplied through the J7 connector and communications handled by one of the optional communications interfaces. See Appendix G for more information.

C.2 SPECIFICATIONS

SPECIFICATION	ENCODER DRIVER CARD (37-1039)
Operating capacity	1 to 8 Actuators
Max. motor current (mA)	500mA
Encoder input	TTL/CMOS compatible
Interfaces - Standard Optional Optional	IBM PC Bus RS232 (37-1088) IEEE 488 (37-1096)
Operating voltage	+ 5V 200mA +12V 50mA +motor(s) -12V 50mA
Digital I/O	16 channels, individually configurable for input or output.
Analog Input	4 channels, 8 bit resolution

C.3 IBM-PC BUS INTERFACE EDGE CONNECTOR

In standard applications the Encoder Driver Card will be fitted into an available expansion slot in a PC chassis. All power and communications will be via the PC bus.

C: Technická data aktuátoru

Appendix B

Encoder Driver Actuators

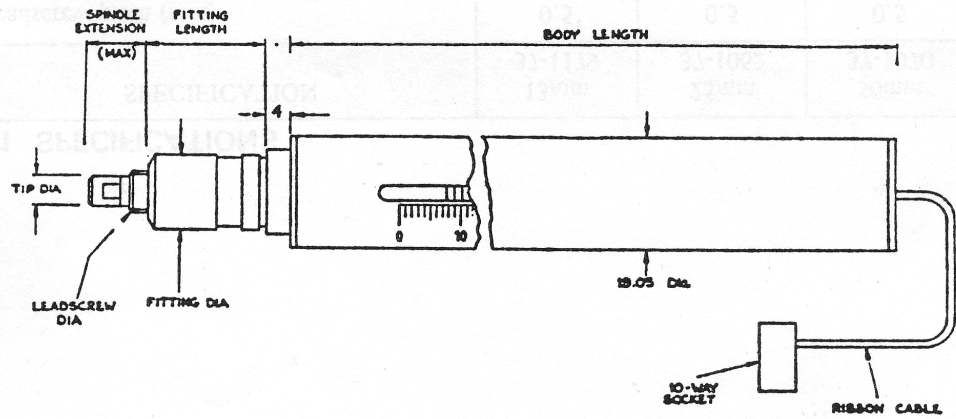
B.1 SPECIFICATIONS

SPECIFICATION	13mm 37-1179	25mm 37-1062	50mm 37-1070
Leadscrew pitch (mm)	0.5	0.5	0.5
Motor speed (rpm - no load)	12,000	12,000	12,000
Gearhead ratio	485:1	485:1	485:1
Max. linear speed (mm/min - no load)	12.0	12.0	12.0
Min. linear speed (mm/min)	0.03	0.03	0.03
Resolution (μm)	0.02	0.02	0.02
Max. continuous output torque (mNm)	100	100	100
Max. intermittent output torque (mNm)	150	150	150
Nominal motor voltage (V DC)	12	12	12
Maximum output power (W)	0.3	0.3	0.3
Max. recommended axial load (kg [lb])	10 [22]	10 [22]	10 [22]

Encoder Drivers

SPECIFICATION	13mm 37-1179	25mm 37-1062	50mm 37-1070
Encoder counts per motor revolution	60	60	60
Repeatability - unidirectional (μm)	0.1	0.1	0.1
Weight (g)	110	130	150

B.2 DIMENSIONS



CAT NO	TRAVEL (mm)	SPINDLE EXT. (mm)	BODY LENGTH (mm)	FITTING LENGTH (mm)	FITTING DIA. (mm)	TIP DIA. (mm)	LEAD SCREW DIA (mm)
37-1179	13.0	19.0	118	9.5	9.52	5	6.0
37-1062	25.0	31.75	132	19.05	12.70	6	7.5
37-1070	50.0	56.75	162	19.05	12.70	6	7.5

D: G-kód pro práci s translačním stolkem

Nastavení programu

MD1, 1MR582, 1WS0, 1TP ;

Definice makra 1

MD2, 1MR-17460, 1WS0, 1TP, 1MR5820, 1WS0, 1TP ; Definice makra 2

RT

rc

1SA99 ;

Nastavení zrychlení na 0.225 mm/sec²

1SV130064 ;

Nastavení rychlosti na 0.100 mm/sec

1SG1000 ;

Nastavení zisku na 500 ; derivace (pro PID)

Vlastní program

1MN ;

Zapnutí motorku

MC2;

Spuštění makra 2

1MF ;

Vypnutí motorku

Popis použitých příkazů:

MD - Macro definition - Definování jednotlivých podpříkazů makra

MR - Move Relative - Příkaz generující pohyb o relativní velikosti n pulsů ($1\text{ mm} = 58200\text{ pulsů}$) ve specifickém směru + nebo -

WS - Wait for stop - Počkat dokud se nezastaví aktuátory před provedením dalších příkazů

TP - Tell current position - Udání stávající polohy

SA - Set acceleration - Nastavení zrychlení

SV - Set velocity - Nastavení rychlosti

SG - Set gain - Nastavení zisku pro PID

MN - Motor on - Zapnutí motorku

MC - Macro - Spuštění makra

MF - Motor off - Vypnutí motorku

Fotopříloha



Foto 1 Justáž experimentální sestavy

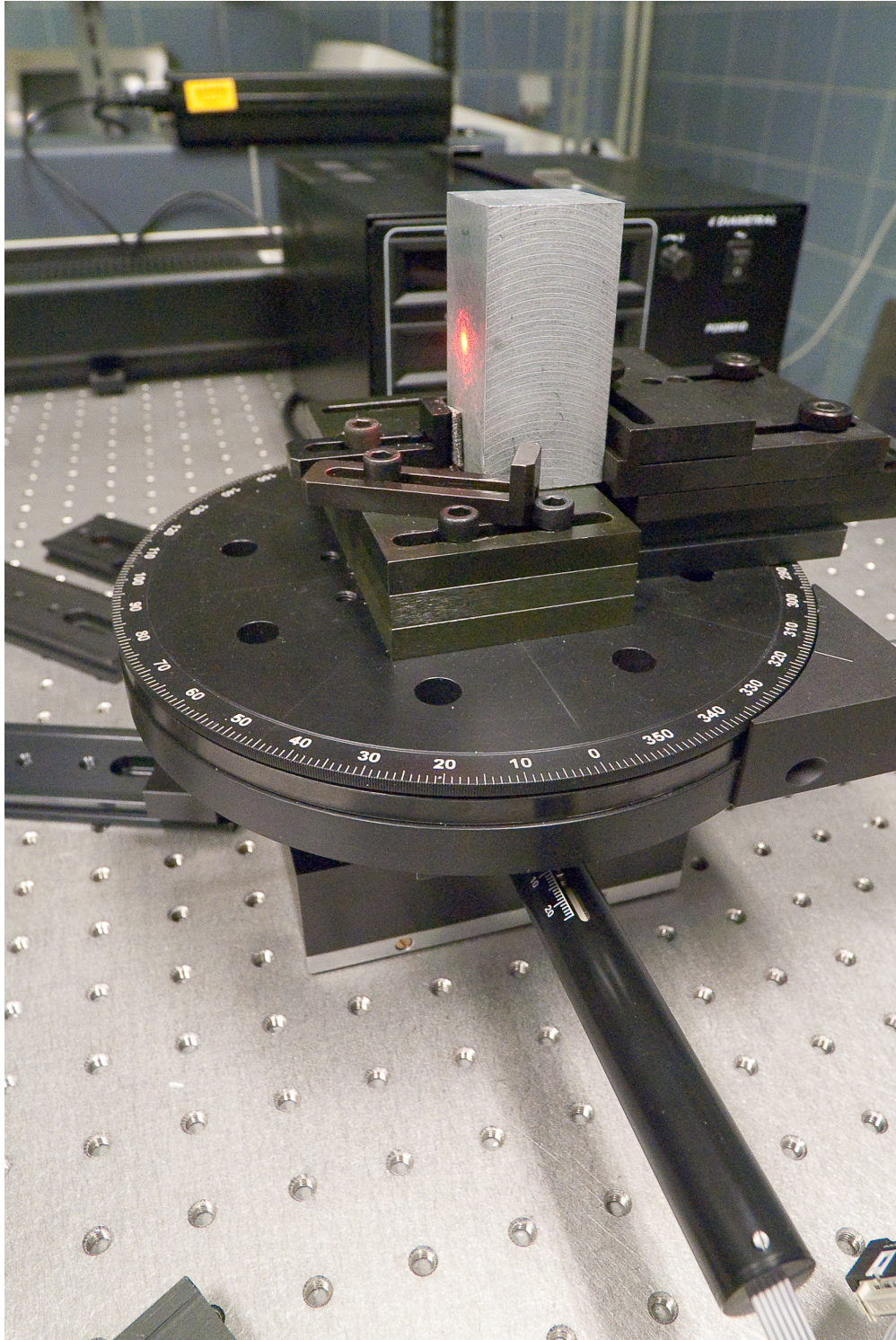


Foto 2 Detail zkoumaného předmětu připevněného k rotačnímu a translačnímu stolku, v dolní části obrázku vidíme aktuátor

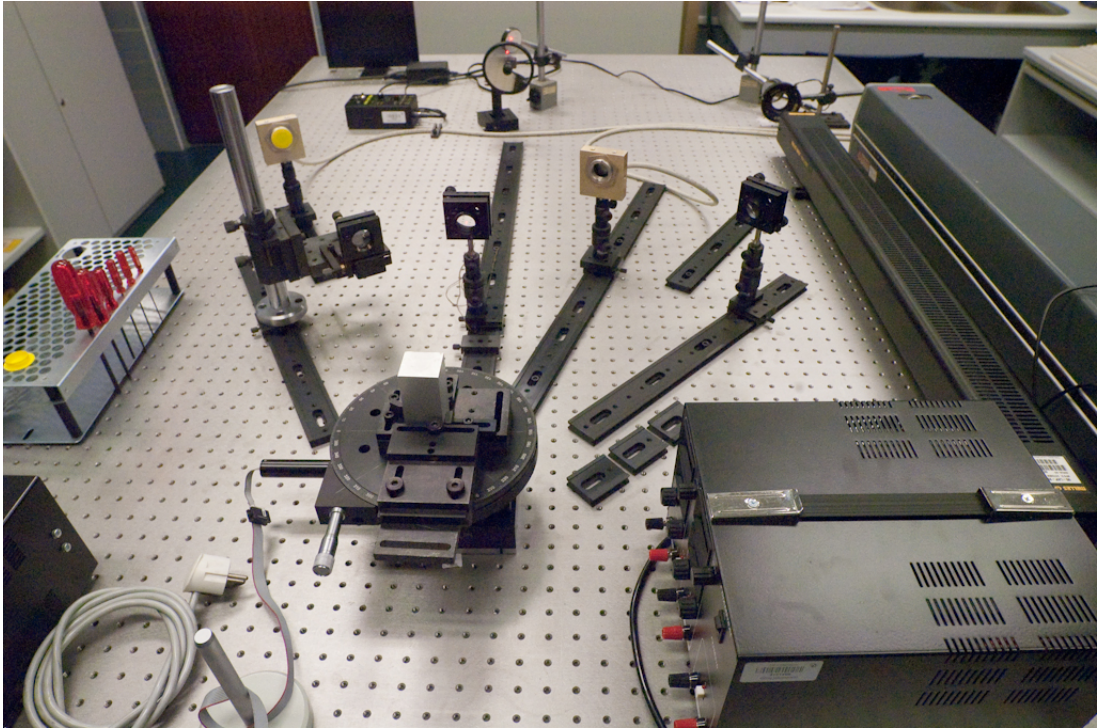


Foto 3 Celkový pohled na experimentální sestavu



Foto 4 Měřený předmět ozářený laserovým svazkem



Foto 5 Vedoucí práce a autor v poli koherenční zrnitosti