

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ověření funkčnosti senzoru pro detekci absolutní polohy
pohybujícího se předmětu s využitím jevu koherenční zrnitost



Autor	Jiří Dráb
Vedoucí práce	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
Studijní obor	Nanotechnologie
Forma studia	Prezenční
Rok	2021

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Jméno a příjmení autora	Jiří Dráb
Název práce	Ověření funkčnosti senzoru pro detekci absolutní polohy pohybujícího se předmětu s využitím jevu koherenční zrnitost
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
Rok obhajoby	2021
Počet stran	67
Počet příloh	4
Jazyk	Český
Abstrakt	Tato práce se věnuje popisu jevu koherenční zrnitost a jeho využití při detekci absolutní polohy pohybujícího se předmětu. Cílem práce je experimentálně ověřit, zda dříve navržený, evropským patentem chráněný, optický měřicí senzor, je dostatečně přesný a použitelný pro reálné aplikace. Ověření funkčnosti senzoru probíhá prostřednictvím fáze kalibrační a následně měřicí, a to při stanovení absolutní polohy zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru zvolené souřadné osy.
Klíčová slova	Koherenční zrnitost, skvrna, translace předmětu, korelace struktur koherenčních zrnitostí, měřicí senzor, interpolace dat

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author's first name and surname	Jiří Dráb
Title	Verification of the functionality of the sensor for detection of a moving object absolute position by making use of speckle effect
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint laboratory of optics
Supervisor	RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.
Year of representation	2021
Number of pages	67
Number of appendices	4
Language	Czech
Abstract	This work deals with the description of the phenomenon of speckle effect and its use in the detection of moving objects absolute position. The goal of this work is to experimentally verify, whether the designed sensor, that is European patent-protected, is sufficiently accurate and if its usable for real applications. The verification of functionality of the sensor is made by calibration phase and then measuring phase, when determining the absolute position of measured object, that is performing a translation movement in the direction of selected coordinate axis.
Keywords	Speckle effect, speckle, object translation, speckle pattern correlation, measurement sensor, data interpolation

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Pavla Horvátha, Ph.D. a za použití literatury a zdrojů citovaných na konci této práce.

V Olomouci dne 17.8.2021

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Pavlu Horváthovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a velké množství času, které mi věnoval jak při konzultacích, tak práci v laboratoři. Také bych chtěl poděkovat ostatním členům laboratoře koherenční zrnitosti ve Společné laboratoři optiky za poskytnuté zázemí, rady a softwarovou podporu pro prováděné experimenty.

Obsah

Úvod	1
1 Fyzikální přehled problematiky.....	2
1.1 Charakteristika světla.....	2
1.2 Koherence světelných vln	3
1.3 Interference světelných vln	4
1.4 Laser	5
1.5 Huygensův-Fresnelův princip.....	5
1.6 Koherenční zrnitost.....	6
1.6.1 Původ a vznik koherenční zrnitosti	6
1.6.2 Třídění pole koherenční zrnitosti.....	7
1.6.3 Statistické vlastnosti koherenční zrnitosti	9
1.6.4 Využití koherenční zrnitosti	10
1.7 Souvislost translace předmětu s posuvem pole koherenční zrnitosti	10
1.8 Funkce vzájemné korelace	14
2 Experiment.....	16
2.1 Technické prvky použité v experimentu	16
2.1.1 Detektor světelného záření.....	16
2.1.2 Translační stolek.....	17
2.2 Volba experimentální sestavy senzoru	18
2.3 Experiment č. 1	20
2.3.1 Přípravná fáze experimentu.....	20
2.3.2 Kalibrační fáze	30
2.3.3 Měřicí fáze.....	30
2.4 Experiment č. 2	31
2.4.1 Přípravná fáze	31
2.4.2 Kalibrační fáze	37
2.4.3 Měřicí fáze.....	38
3 Výsledky měření.....	39
3.1 Výsledky experimentu č. 1	39
3.2 Výsledky experimentu č. 2	42
4 Diskuse	45

Závěr.....	51
Seznam literatury	53
Přílohy	54
Příloha 1 – Technický list kamery CMOS.....	54
Příloha 2 – Technický list translačního stolku	56
Příloha 3 – G kódy ovládající translační stolek.....	57
Příloha 4 – Použité skripty v matematickém software Octave	59

Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou bezkontaktní detekce absolutní polohy pohybujícího se předmětu s využitím jevy koherenční zrnitost. Tento způsob detekce včetně zařízení (optický měřicí senzor) pro provádění dané detekce byly navrženy na pracovišti Společné laboratoře optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu akademie věd České republiky a následně získaly patentovou ochranu [1]. Cílem předložené práce je experimentálně ověřit, zda navržený optický měřicí senzor je dostatečně přesný a použitelný pro reálné aplikace. Ověření funkčnosti senzoru probíhá prostřednictvím fáze kalibrační a následně měřicí, a to při stanovení absolutní polohy zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru zvolené souřadné osy.

Kromě ověření funkčnosti patentovaného měřicího senzoru je cílem této práce také navržení konkrétních experimentálních sestav senzoru, tj. volby příslušných geometrických a optických parametrů sestavy, za účelem dosažení různých měřicích rozsahů a minimálních měřicích kroků při detekci absolutní translace pohybujícího se zkoumaného předmětu. Důležitou částí bakalářské práce je také softwarová podpora experimentu, přesněji tvorba jednotlivých skriptů v software Octave, pro zpracování, vyhodnocení a grafickou interpretaci naměřených dat.

1 Fyzikální přehled problematiky

V této kapitole jsou uvedeny základní fyzikální pojmy a principy související s problematikou bakalářské práce. Po vysvětlení podstaty světelného záření jsou objasněny pojmy koherence světla, interference světla, Huygensův-Fresnelův princip a základní principy fungování laseru. Následně se pozornost zaměří na problematiku jevu koherenční zrnitosti. Budou zde popsány principy vzniku tohoto jevu a uvedeny jeho základní vlastnosti včetně statistických a také popsány některé aplikace koherenční zrnitosti v různých vědních oborech.

1.1 Charakteristika světla

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění [2] šířící se jakýmkoliv prostředím, tedy i vakuem, přičemž jeho rychlost ve vakuu představuje maximální mezní hodnotu rychlosti, kterou žádný objekt není schopen překonat. Kromě rychlosti světlo charakterizují dvě hlavní veličiny, vlnová délka λ a frekvence f , pro které platí vztah

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1)$$

Jakožto elektromagnetické vlnění se světlo skládá ze dvou složek, vektoru elektrické intenzity $\vec{E}(\vec{r}, t)$ a vektoru magnetické intenzity $\vec{H}(\vec{r}, t)$, pro které platí následující vzorce [3]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r})e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

a

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r})e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

kde \vec{r} je polohový vektor, i vyjadřuje imaginární jednotku, ω značí úhlovou frekvenci vlnění a t čas. Celkovou intenzitu elektromagnetického vlnění I pak můžeme vyjádřit jako [4]

$$I = |\vec{E} \times \vec{H}|. \quad (4)$$

Viditelná část elektromagnetického spektra se nachází v rozmezí vlnových délek λ od 390 nm do 760 nm, kterému odpovídají frekvence f v rozsahu od $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz do $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz. Tato část spektra nás nadále bude zajímat, a proto v této práci používaný výraz světlo bude vyjadřovat jen jeho viditelnou část.

1.2 Koherence světelných vln

Koherence světla [2] je pojem vyjadřující vzájemnou souvislost amplitudy a fáze světelných vln vycházejících ze dvou rozdílných zdrojů světla nebo z jednoho zdroje, ale s časovým zpožděním. Rozlišujeme tedy koherenci prostorovou a časovou. O dvou vlnách se dá říci, že jsou koherentní, pokud je jejich fázový rozdíl konstantní, jsou monochromatické, izochronní (mají stejnou frekvenci) a stejně polarizované. Polarizované světlo znamená, že vektor elektrické a magnetické intenzity kmitá definovaně v určité rovině kolmé na směr šíření světla [3]. Pokud by toto kmitání v dané rovině bylo náhodné, světlo by bylo nepolarizované. Polarizace světla může být lineární, kruhová nebo eliptická. V případě lineární polarizace směr koncových bodů výše uvedených vektorů kmitá po přímce. V případě kruhové nebo eliptické polarizace koncové body vektorů opisují trajektorii po kružnici nebo elipse.

Stupeň časové koherence $g(\tau)$ stacionárního světelného záření určuje, jak dokonale se vlny mohou či nemohou skládat, a je definován jako

$$g(\tau) = \frac{\langle U^*(t)U(t+\tau) \rangle}{\langle U^*(t)U(t) \rangle}, \quad (5)$$

kde závorky $\langle \rangle$ vyjadřují střední hodnotu, $U(t)$ reprezentuje komplexní funkci světelné vlny v čase t a $U(t+\tau)$ komplexní funkci v čase $t+\tau$, kde τ vyjadřuje časový posuv mezi vlnami. Veličina U^* představuje komplexně sdruženou funkci. Hodnota $g(\tau)$ se pak pohybuje v intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, kdy nula značí nekoherentní vlny, zatímco jednička ty zcela koherentní. Čím větší hodnoty funkce $g(\tau)$ dosáhne, tím bude větší stupeň koherence světelných vln. Pokud je $g(\tau)$ klesající funkcí, definujeme koherenční dobu τ_c , která udává dobu, za kterou funkce $g(\tau)$ klesne na jednu polovinu [3]. Pro $\tau > \tau_c$ světelné vlny přestávají být koherentní.

Vzdálenost, kterou vlna urazí za koherenční dobu τ_c , označujeme jako koherenční délka l_c [2]. Pokud je vzájemný dráhový rozdíl světelných vln větší než koherenční délka l_c , vlny přestávají být koherentní. Koherenční délku určujeme dle vztahu

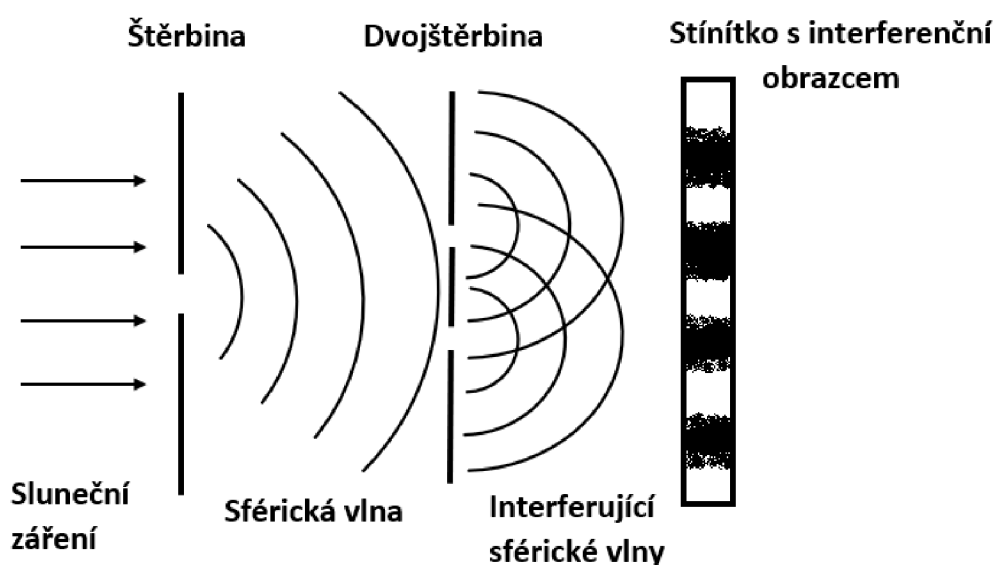
$$l_c = \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (6)$$

kde $\Delta\nu$ je frekvenční rozšíření spektrální čáry světelné vlny. Tento údaj získáme jako převrácenou hodnotu koherenční doby τ_c .

1.3 Interference světelných vln

Interference světla je proces skládání okamžitých hodnot elektrické a magnetické složky světelného vlnění [2]. Dochází k ní při střetu vln z různých zdrojů světla, popřípadě z jednoho zdroje, ale s určitým časovým zpožděním. Vlnění také musí být koherentní. Při interferenci světla pozorujeme zesilování či zeslabování výsledné vlny, tedy vznik interferenčních maxim a minim.

Interference byla poprvé pozorována roku 1663 Robertem Boylem, nicméně první významné experimenty provedl až začátkem 19. století Thomas Young (viz Obrázek 1). Ten osvětlil malou štěrbinu slunečním světlem, které není koherentní, čímž vytvořil bodový zdroj vyzařující sférickou světelnou vlnu a zvýšil tak prostorovou koherenci světla. Tato vlna poté dopadá na otvory dvojštěrbiny ležící na stejné vlnoploše šířící se sférické vlny, přičemž ty se opět chovají jako bodové zdroje světla. Světelné vlny z dvojštěrbin pak mohou interferovat. Na stínítku umístěném za štěrbinami poté vznikají interferenční proužky – interferenční minima a maxima [2]. Světlý proužek odpovídá maximu a nastává, když dráhový rozdíl interferujících světelných vln odpovídá celočíselnému násobku vlnové délky záření. Tento jev se nazývá konstruktivní interference. Tmavý proužek odpovídá minimu a vzniká v místech, kde dráhový rozdíl interferujících vln odpovídá lichému násobku poloviny vlnové délky daného záření. Tato situace se označuje jako destruktivní interference.



Obrázek 1: Schéma Youngova experimentu.

1.4 Laser

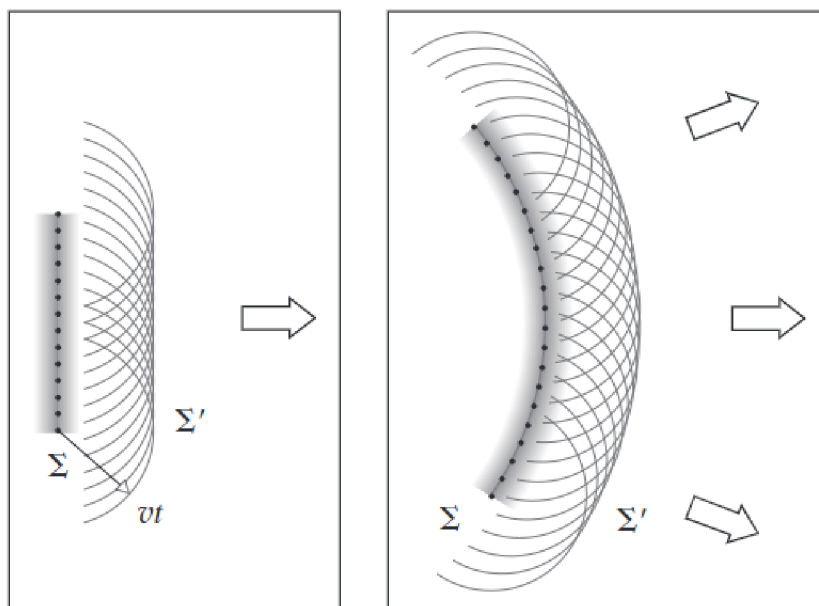
Laser [5], z anglického Light Amplification by Stimulated emission of Radiation, je zařízení pro získání elektromagnetického záření. Světlo z laseru je koherentní, monochromatické a je vyzařováno v úzkém svazku. Obecně je laser tvořen zdrojem energie, aktivním prostředím a rezonátorem. Zdroj je komponenta dodávající energii do aktivního prostředí. Tento jev označujeme jako čerpání. Energie excituje elektrony v aktivním prostředí do takové míry, že dochází k inverzi populace – stavu, kdy je většina elektronů excitována a dochází k nabourání rovnovážného stavu systému. Elektrony poté sestupují zpět na základní hladinu, čímž dochází k emitaci kvanta energie – fotonu. Aktivní prostředí je umístěno v rezonátoru tvořeném zrcadly, dochází tedy k odrazům proudu fotonů a jejich opakovanému průchodu systémem. Tím následně interagují s dalšími excitovanými elektrony, stimulují je a dochází ke vzniku velkého množství emitovaných fotonů se stejnou frekvencí a fází. Tento jev je označován jako stimulovaná emise. Jedno ze zrcadel rezonátoru je částečně propustné, tím laserový svazek uniká ven a “svítí” [5]. Zrcadla musí být dobře optimalizovaná, aby zisk převyšil ztráty svazku při odrazech mezi nimi.

Rozdělení jednotlivých druhů laserů se většinou provádí dle druhu aktivního prostředí, které je zdrojem fotonů. U plynových laserů je aktivní prostředí tvořeno atomy, ionty nebo molekulami plynu, které se excitují elektrickým výbojem. Základem pevnolátkových laserů jsou izolanty s příměsemi, jež jsou také schopny generovat infračervené záření. Polovodičové lasery dosahují inverze populace průchodem elektrického proudu diodou. Kapalinové lasery využívají aktivního prostředí tvořeného roztokem organického barviva, proto se jim také říká barvivové lasery. V závislosti na barvivu jsou schopny generovat infračervené i ultrafialové záření [6].

V experimentu, kterému se věnuje tato bakalářská práce, je jako zdroj světla použit plynový He-Ne laser o vlnové délce $\lambda = 632,8$ nm.

1.5 Huygensův-Fresnelův princip

Huygensův-Fresnelův princip popisuje šíření světelných vln v izotropním prostředí se stejnou rychlostí v každém směru od bodového zdroje. Vlnění se znázorňuje jako sférická vlnoplocha – množina pohybujících se bodů se stejnou fází. Směr šíření každého bodu je dán normálou k povrchu vlnoplochy v daném bodě. Na všechny body šířící se vlny lze pohlížet jako na nové bodové zdroje sekundárních vlnoploch pohybujících se stejným směrem [4], což je ukázáno na Obrázku 2.

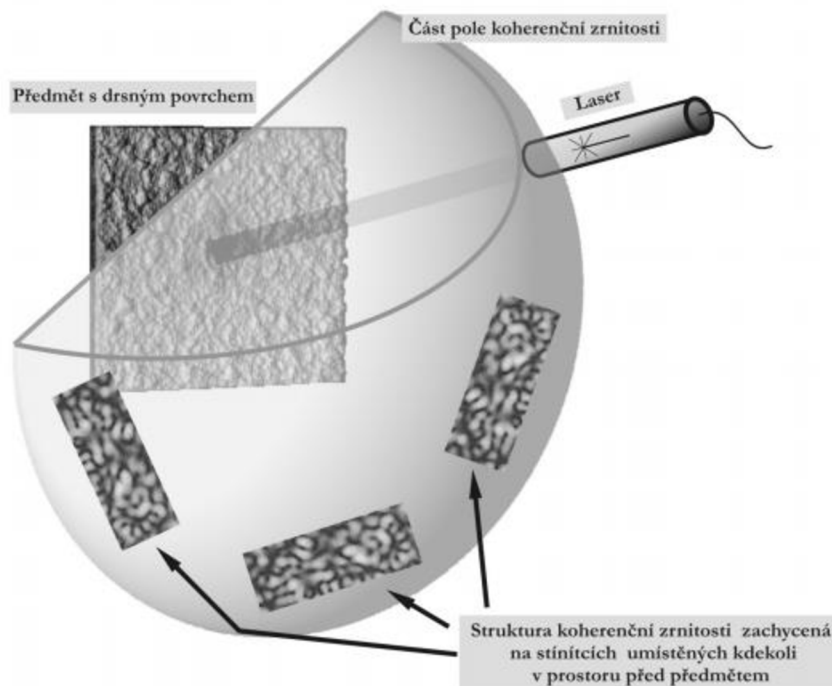


Obrázek 2: Huygensův-Fresnelův princip. Každý bod šířící se sférické vlnoplochy představuje nový bodový zdroj, sférické vlny. Převzato z [4].

1.6 Koherenční zrnitost

1.6.1 Původ a vznik koherenční zrnitosti

Koherenční zrnitost [7], někdy také označovaná jako spekl (z anglického speckle = skvrna), je optický jev nastávající při difúzním rozptylu světla. Tento rozptyl může být způsoben odrazem od opticky drsného povrchu, nebo průchodem svazku přes difúzní rozptylující prostředí. Opticky drsný povrch znamená, že se skládá z velkého množství náhodně umístěných mikroskopických plošek, přičemž střední hodnota výškového reliéfu povrchu předmětu tvořených ploškami překračuje vlnovou délku dopadajícího světla. Po ozáření světelným svazkem se tyto plošky stávají bodovými zdroji sekundárních kulových vln šířících se pomocí Huygensova-Fresnelova principu. V celém poloprostoru před objektem, v případě odrazu od předmětu, viz Obrázek 3, poté nastává interference světelných vln, což vede ke vzniku náhodně rozložených interferenčních minim a maxim, které nazýváme polem koherenční zrnitosti. Při vytvoření řezu tímto polem, například umístěním stínítka nebo detektoru, získáme strukturu koherenční zrnitosti. Ta se skládá z náhodně rozložených tmavých a světlých skvrn – intenzitních minim a maxim. Strukturu koherenční zrnitosti provedeme řezem jednotlivými zrny. Tato zrna se dají v prostoru vizualizovat, i když obecně viditelná nejsou. Při vizualizaci pole koherenční zrnitosti můžeme trojdimenzionální zrna přirovnat tvarem k doutníku [7].



Obrázek 3: Vznik pole a struktury koherenční zrnitosti odrazem od opticky drsného povrchu. Převzato z [7].

1.6.2 Třídění pole koherenční zrnitosti

Pole koherenční zrnitosti můžeme rozdělit na dva typy, a to v závislosti na prostředí, kterým se pole šíří:

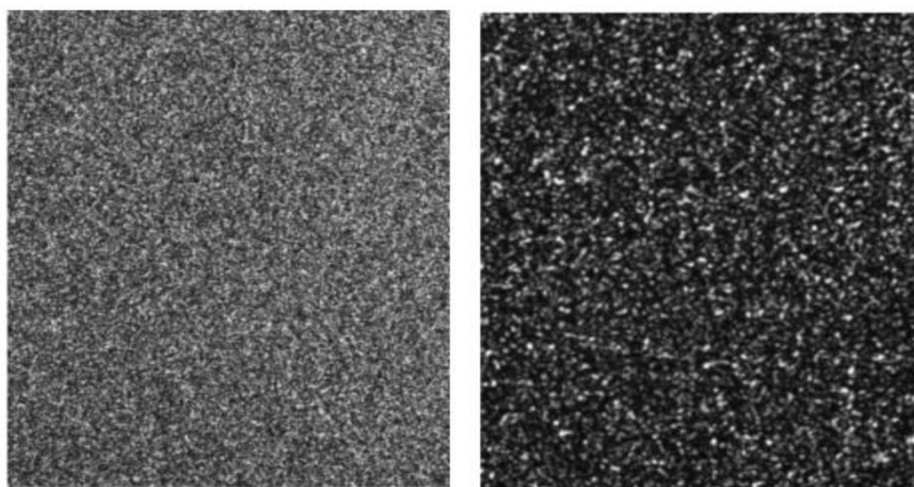
1. Objektivní pole koherenční zrnitosti je takové, kdy k šíření světla dochází v opticky volném poli, tedy mezi objektem generujícím pole koherenční zrnitosti a detektorem pozorujícím strukturu koherenční zrnitosti se nenachází žádný optický systém [7].
2. Subjektivní pole koherenční zrnitosti vzniká, pokud je mezi předmětem a detektorem umístěn nějaký optický systém, například čočka. Pole koherenční zrnitosti i jeho struktura jsou pak ovlivněny parametry tohoto optického systému [7].

Jak je možné vidět na Obrázku 4, lze volbou optické soustavy ovlivňovat velikost zrn. Pokud se omezíme na velikost zrn (skvrn) v rovině kolmé ke směru šíření objektivního pole koherenční zrnitosti, můžeme vyjádřit střední hodnotu velikosti d skvrny jako [8]

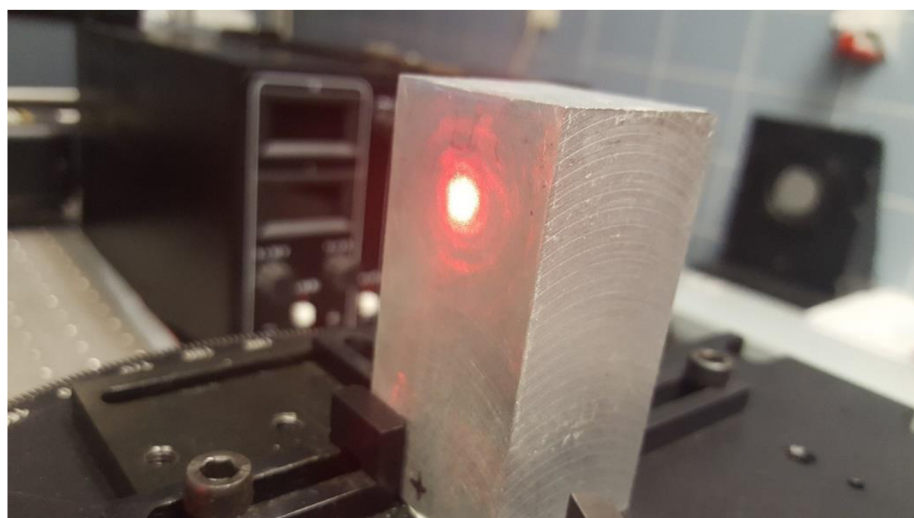
$$d \approx 1,2 \frac{\lambda z}{D}, \quad (7)$$

kde z vyjadřuje vzdálenost roviny pozorování od osvětleného povrchu předmětu, λ je vlnová délka dopadajícího světla a D průměr osvětlené plošky povrchu předmětu. Ze vztahu (7) vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od předmětu roste i velikost skvrn, naopak se zvětšováním osvětlené plochy předmětu se jejich velikost zmenšuje.

Na Obrázku 5 můžeme pozorovat osvětlenou plošku na povrchu zkoumaného předmětu (hliníkový kvádr) zaznamenanou během experimentu, který je popsán v další části této práce. Volba velikosti skvrn ve struktuře koherenční zrnitosti hraje klíčovou roli v řadě metrologických aplikací tohoto jevu [7].



Obrázek 4: Struktura koherenční zrnitosti objektivní (vlevo) a subjektivní (vpravo).
Převzato z [7].



Obrázek 5: Fotografie osvětlené plošky na povrchu předmětu.

V případě subjektivního pole koherenční zrnitosti závisí střední velikost skvrn na numerické apertuře optické sestavy N_A , tudíž platí [8]

$$d \approx 0,6 \frac{\lambda}{N_A}. \quad (8)$$

1.6.3 Statistické vlastnosti koherenční zrnitosti

Struktura koherenční zrnitosti je tvořena náhodným rozložením interferenčních minim a maxim, a má tedy statistický charakter. Veličiny charakterizující toto světelné vlnění se proto dají považovat za náhodné veličiny [8]. Při statistickém zpracování se používají střední hodnoty těchto veličin z důvodu odlišení od šumu a náhodných fluktuací jiného vlnění.

V této práci se budeme věnovat pouze statistickým vlastnostem pole koherenční zrnitosti prvního řádu, tedy vlastnostem v jednom bodě v prostoru, za předpokladu úplně polarizovaného a koherentního pole. To znamená, že ve všech bodech prostoru dochází k interferenci koherentních světelných vln. Intenzita I a fáze Φ a jsou spojitými náhodnými veličinami a jejich hustoty pravděpodobnosti $p_I(v)$ a $p_\Phi(w)$ se dle [7] dají vyjádřit jako

$$p_I(v) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{v}{\langle I \rangle}}, \quad (9)$$

a

$$p_\Phi(w) = \frac{1}{2\pi} \text{Rect}\left(\frac{w}{2\pi}\right), \quad (10)$$

kde $\langle I \rangle$ je střední hodnota intenzity, v je hodnota intenzity a w představuje hodnotu fáze. Tyto pravděpodobnosti platí jak pro objektivní, tak subjektivní pole koherenční zrnitosti.

Ze vzorců (9) a (10) plyne, že hustota pravděpodobnosti intenzity $p_I(v)$ se řídí exponenciálním rozdělením, a tedy s největší pravděpodobností v libovolném bodě pole koherenční zrnitosti nastane nulová hodnota intenzity světla, $v = 0$. Uvidíme tedy černou tečku. Hustota pravděpodobnosti fáze $p_\Phi(w)$ se řídí rovnoměrným rozdělením na intervalu $\langle -\pi; \pi \rangle$. Rovnoměrné rozdělení znamená, že jakákoliv hodnota fáze v daném bodě pole koherenční zrnitosti je stejně pravděpodobná.

1.6.4 Využití koherenční zrnitosti

Jev koherenční zrnitosti byl v minulosti považován za parazitní, neboť při optických experimentech způsoboval rušivý šum, a to především v holografii. Při zkoumání tohoto jevu z důvodu jeho potlačení však vyšlo najevo, že má mnohá praktická využití [7].

Důležitou aplikací jevu je jeho využití v mechanice kontinua při měření malých deformací tělesa za pomoci metody korelace polí koherenční zrnitosti. Tato problematika byla popsána například v monografii [9] nebo později ve studijním textu [7] kolektivem autorů ze Společné laboratoře optiky M. Hrabovským, Z. Bačou, P. Horváthem a P. Šmídem.

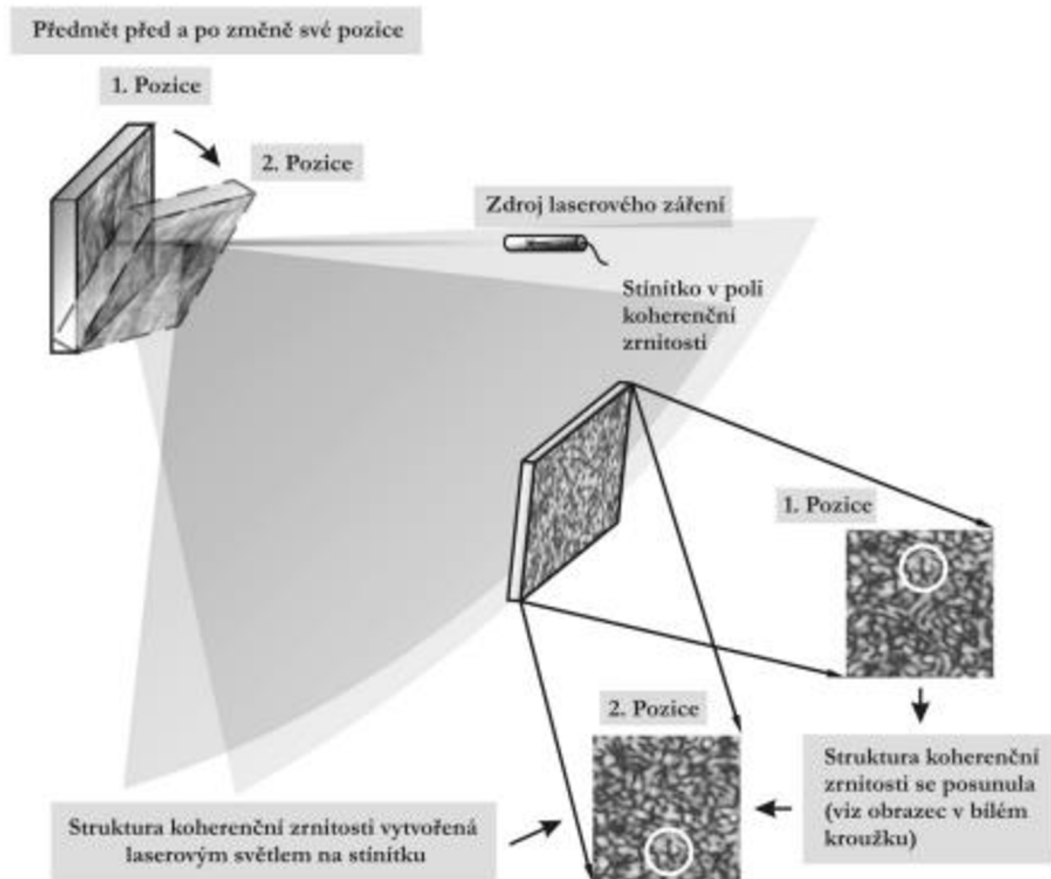
Mezi další obory lidské činnosti spjatými s aplikací jevu koherenční zrnitosti patří biologie a ekologie, kde byl tento jev využit například při sledování biologické aktivity rostlin. Tato činnost probíhá sledováním změn struktury koherenční zrnitosti vzniklé osvětlením listu zkoumané rostliny. Pokud v daném listu dochází k biologickým procesům, tedy aktivitám uvnitř buněk, lze pozorovat změny struktury koherenční zrnitosti. Tomuto tématu se věnuje například bakalářská práce J. Pechníka [10].

Další zajímavou aplikaci koherenční zrnitosti najdeme v astronomii, kde se využívá techniky stelární interferometrie na bázi koherenční zrnitosti k detekci dvojhvězd [8].

1.7 Souvislost translace předmětu s posuvem pole koherenční zrnitosti

Při změně stavu zkoumaného tělesa, tedy i jeho povrchu, dochází ke změně pole koherenční zrnitosti. Například při translaci předmětu dojde k posuvu zaznamenané struktury koherenční zrnitosti ve směru jeho translace. Na ilustračním obrázku lze pozorovat, že k posuvu struktury koherenční zrnitosti dochází i při rotačním pohybu sledovaného předmětu (viz Obrázek 6).

Vyhodnocení translace předmětu, například ve směru souřadné osy x , je možné určit následujícím způsobem. Digitální maticovou CMOS kamerou se zaznamená struktura koherenční zrnitosti odpovídající stavu před a po translaci předmětu. Následně se provede korelace, tedy porovnání, zaznamenaných snímků struktur koherenčních zrnitostí. Tato probíhá porovnáním intenzitních signálů zaznamenaných ve zvoleném řádku snímku struktury koherenční zrnitosti [9]. Tímto matematickým postupem lze určit vzájemnou velikost posuvu intenzitních signálů, tedy i vzájemný posuv struktury koherenční zrnitosti A_x způsobený translací předmětu a_x . Posuv struktury koherenční zrnitosti A_x se ovšem liší od skutečné velikosti translace předmětu a_x , a to v závislosti na geometrických parametrech zvolené optické soustavy.



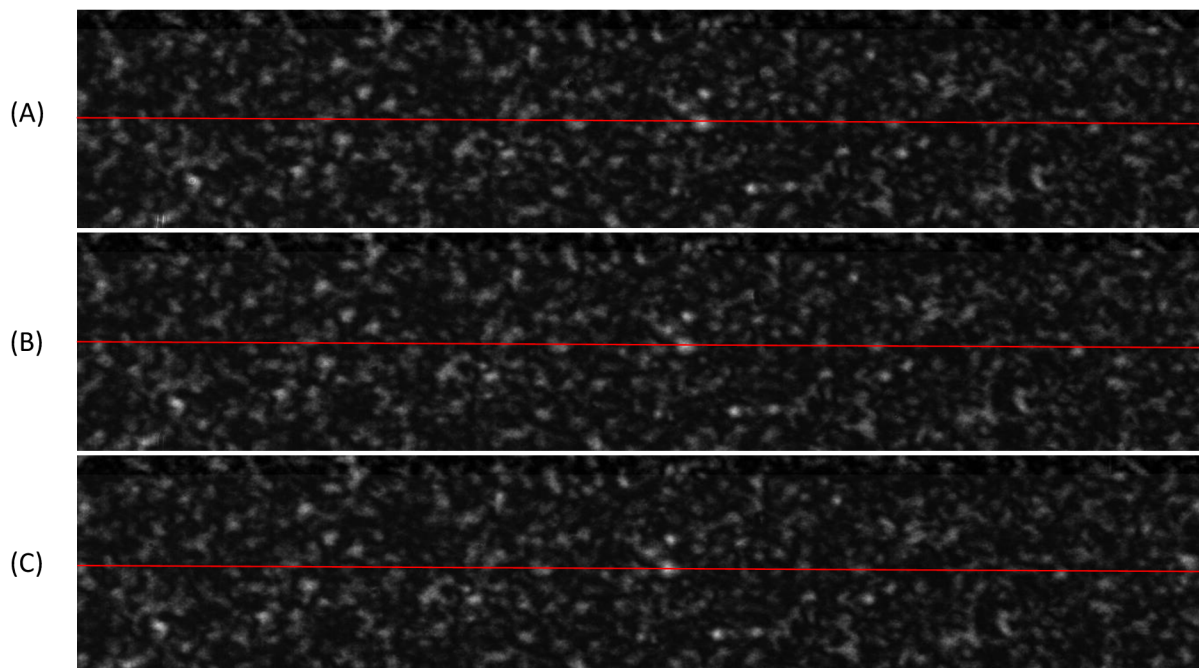
Obrázek 6: Posuv struktury koherenční zrnitosti způsobené změnou polohy zkoumaného tělesa. Převzato z [7].

Pro přepočítání posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x na reálný posuv předmětu a_x se použije vzorec dle [7]

$$a_x = \frac{p A_x}{\left(\frac{L_o \cos^2(\theta_s)}{L_s \cos(\theta_o)} + \cos(\theta_o) \right)}, \quad (11)$$

kde p je velikost pixelu použité kamery, L_o vzdálenost mezi předmětem a kamerou, L_s vzdálenost mezi předmětem a bodovým zdrojem osvětlení, θ_s úhel směru osvětlení a θ_o úhel směru pozorování. Vzorec (11) reprezentuje výsledný vztah metody korelace polí koherenční zrnitosti umožňující na základě zvolených geometrických parametrů optické sestavy a při vypočtení vzájemných posuvů struktur koherenčních zrnitostí stanovit hledaný posuv předmětu [7].

Při změně stavu zkoumaného tělesa dojde nejen k posuvu, ale i ke změně parametrů struktury koherenční zrnitosti. Tento jev se pak označuje jako dekorelace pole (struktury) koherenční zrnitosti.

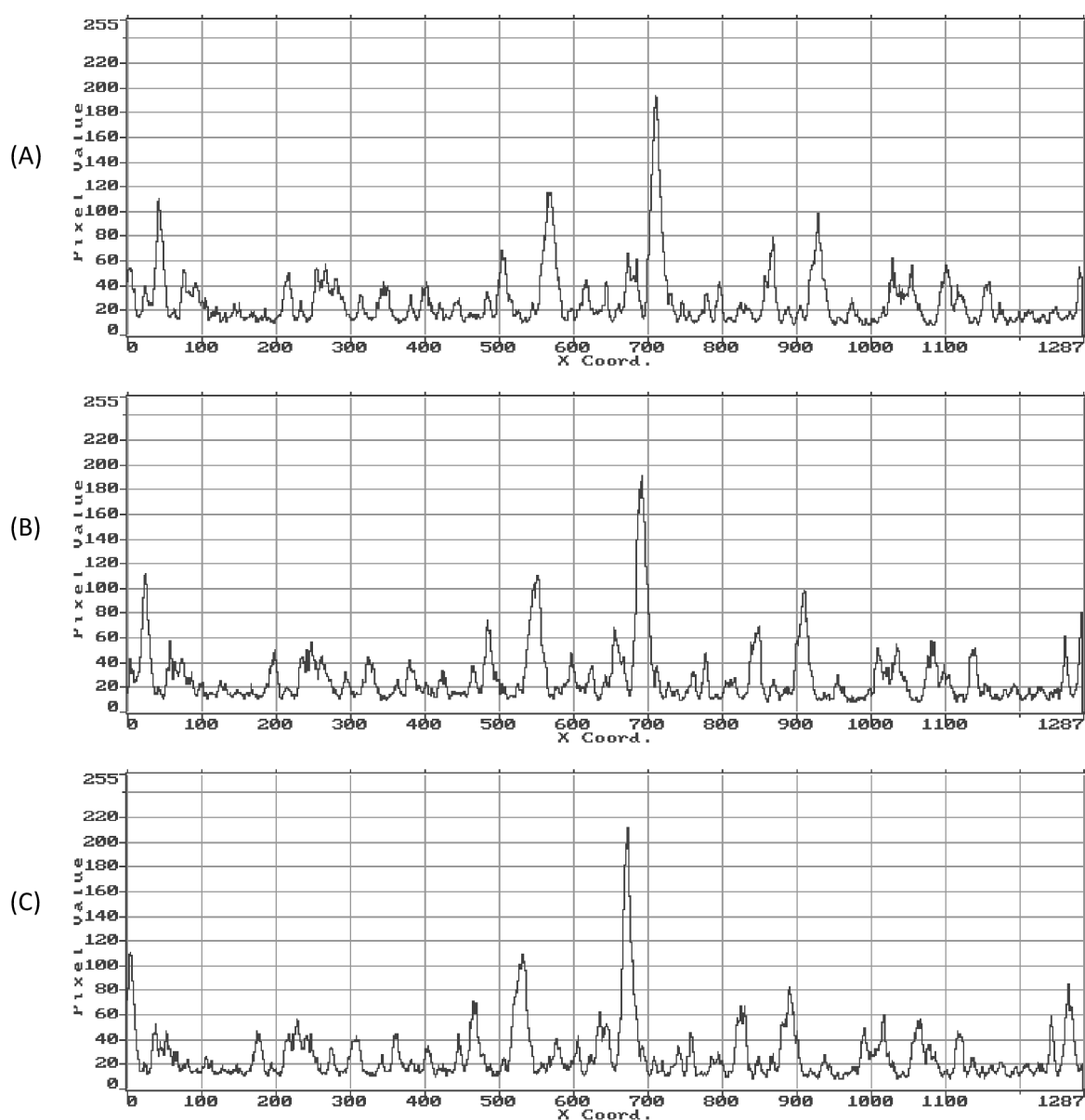


Obrázek 7: Snímky struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných na CMOS kameru při posuvu osvětleného předmětu ve směru souřadné osy x . Předmět je ve výchozí pozici (A) a poté je posunut o 20 mikrometrů (B), anebo o 40 mikrometrů (C). Červená čára reprezentuje zvolený řádek ve snímku struktury koherenční zrnitosti, ze kterého je vyčten intenzitní signál (viz Obrázek 8).

Příklad reálného posuvu struktury koherenční zrnitosti je uveden na Obrázku 7. Část (A) obrázku představuje strukturu koherenční zrnitosti získanou po osvětlení předmětu v jeho výchozí pozici. Části (B) a (C) obrázku pak reprezentují struktury koherenčních zrnitostí odpovídající osvětlenému předmětu posunutému o 20 mikrometrů a 40 mikrometrů. Červená čára představuje zvolený řádek snímku struktury koherenční zrnitosti, ze kterého je vyčítán intenzitní signál. Pro všechny tři části Obrázku 7 je tento intenzitní signál prezentován graficky v Obrázku 8, a to analogicky pro části (A), (B) a (C). Hodnoty zaznamenaných intenzit jsou vyčítány pro každý pixel zvoleného řádku kamery v osmibitové škále stupně šedi, tedy v rozsahu hodnot 0 až 255. Úplně tmavý bod ve struktuře koherenční zrnitosti by tak měl být reprezentován nulovou hodnotou. V jednotlivých grafech na Obrázku 8 lze ale pozorovat, že hodnota intenzity nikdy neklesne na nulovou hodnotu, což je způsobeno šumem kamery. Tento šum je v kameře možné odstranit.

Ve všech grafech na Obrázku 8 lze také vidět, že nejvyšší hodnota intenzity (nejvyšší pík) představující nejsvětlejší bod ve zvoleném řádku (cca uprostřed) na snímcích struktury koherenční zrnitosti na Obrázku 7 se opravdu během translace předmětu pohybuje ve směru souřadné osy x (doleva). Z toho tedy jasně vyplývá, že pro vyhodnocení posuvu struktury koherenční zrnitosti a potažmo i translace zkoumaného předmětu není nutné pracovat s celým snímkem struktury koherenční zrnitosti, ale

pouze s jedním řádkem této struktury. Tohoto principu je využito i v metodě korelace polí koherenční zrnitosti.



Obrázek 8: Graf průběhu intenzitního signálu vyčteného ve zvoleném řádku (červená čára) snímku struktury koherenční zrnitosti na Obrázku 7 pro odpovídající si části (A), (B) a (C).

Vysoké hodnoty signálu (píky) představují intenzitní maxima – světlé body a nízké hodnoty signálu intenzitní minima – tmavé body. Pozice, resp. posuv intenzitního signálu odpovídají předmětu ve výchozí pozici (A) nebo předmětu posunutému o 20 mikrometrů (B), respektive o 40 mikrometrů (C).

1.8 Funkce vzájemné korelace

Jak již bylo řečeno, pole, resp. struktura koherenční zrnitosti, mají statistický charakter, a proto při hledání podobnosti mezi těmito strukturami lze použít nástroje matematické statistiky. Posunutí pole, resp. struktury koherenční zrnitosti, lze matematicky stanovit ze změny polohy maxima funkce vzájemné korelace intenzit polí, resp. struktur koherenčních zrnitostí, zaznamenaných před a po translaci předmětu.

Pro tento výpočet podobnosti dvou snímků struktur koherenčních zrnitostí je výhodné použít normovanou funkci vzájemné korelace $r_{1,2}(\Delta x)$ intenzit, která je daná vzorcem [9]

$$r_{1,2}(\Delta x) = \frac{\langle I_1(x)I_2(x + \Delta x) \rangle - \langle I_1(x) \rangle \langle I_2(x) \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2(x) \rangle - \langle I_1(x) \rangle^2} \sqrt{\langle I_2^2(x) \rangle - \langle I_2(x) \rangle^2}}, \quad (12)$$

kde $I_1(x)$ a $I_2(x)$ vyjadřují intenzity v bodech zvoleného řádku (ve směru souřadné osy x) prvního a druhého snímku struktury koherenční zrnitosti a Δx reprezentuje hodnotu vzájemného posuvu snímků struktur koherenčních zrnitostí dané polohou maxima normované funkce vzájemné korelace. Normovaná funkce vzájemné korelace (normovaná korelační funkce) je jednodimenzionální (porovnává řádky) a může nabývat hodnot v intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, kde hodnota 1 vyjadřuje maximální podobnost, a tedy to, že porovnávané intenzitní signály v řádcích obou snímků jsou stejné (nedošlo k posuvu mezi snímky struktur koherenčních zrnitostí). Hodnota 0 naopak značí, že porovnávané intenzitní signály nemají žádnou podobnost (není možné zjistit, k jak velkému posuvu mezi snímky struktur koherenčních zrnitostí došlo).

Vzorec (12) platí pro stacionární náhodné procesy. V našem případě ale není proměnnou čas, nýbrž souřadnice, a proto stacionární náhodný proces lze chápat jako náhodný proces, jehož střední hodnota se změnou souřadnice nemění [9]. V praktickém případě při použití maticového senzoru, ve kterém se omezíme na jeden řádek s konečným počtem pixelů, lze vzorec (12) přepsat jako

$$r_{1,2}(\Delta x) = \frac{\frac{1}{N - \Delta x} \sum_1^{N - \Delta x} I_1(x)I_2(x + \Delta x) - \frac{1}{N} \sum_1^N I_1(x) \cdot \frac{1}{N} \sum_1^N I_2(x)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N I_1^2(x) - \left(\frac{1}{N} \sum_1^N I_1(x)\right)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N I_2^2(x) - \left(\frac{1}{N} \sum_1^N I_2(x)\right)^2}}, \quad (13)$$

kde N je počet hodnot (pixelů) v daném řádku matice. Námi hledaná velikost posuvu Δx struktury koherenční zrnitosti pak odpovídá pozici maxima normované korelační funkce $r_{1,2}(\Delta x)$.

Během prováděného experimentu, jehož popis následuje v další části práce, se ovšem ukázalo užití vzorce (13) jako nevhodné, neboť docházelo k velmi rychlému poklesu hodnoty normované korelační funkce se zvětšujícím se posuvem mezi strukturami koherenčních zrnitostí. Proto bylo zvoleno pro výpočet normované funkce vzájemné korelace $r_{1,2}(\Delta x)$ použití obecnějšího vzorce, který místo s hodnotami intenzit I pracuje s jejich odchylkami ΔI , kde $\Delta I = I - \langle I \rangle$,

$$r_{1,2}(\Delta x) = \frac{\langle \Delta I_1(x) \Delta I_2(x + \Delta x) \rangle}{\sqrt{\langle \Delta I_1^2(x) \rangle - \langle \Delta I_1(x) \rangle^2} \sqrt{\langle \Delta I_2^2(x) \rangle - \langle \Delta I_2(x) \rangle^2}}. \quad (14)$$

V praktickém případě, opět při použití zvoleného řádku maticového senzoru s konečným počtem pixelů, lze vzorec (14) přepsat jako

$$r_{1,2}(\Delta x) = \frac{\frac{1}{N - \Delta x} \sum_1^{N - \Delta x} \Delta I_1(x) \Delta I_2(x + \Delta x)}{\sqrt{\frac{1}{N - \Delta x} \sum_1^{N - \Delta x} \Delta I_1^2(x)} \sqrt{\frac{1}{N - \Delta x} \sum_1^{N - \Delta x} \Delta I_2^2(x + \Delta x)}}. \quad (15)$$

Velikost posuvu struktur koherenčních zrnitostí určená pomocí vztahu (15) se následně dosadí do rovnice (11) jako veličina A_x . Odtud lze pak díky znalostem geometrických parametrů optické soustavy poměrně snadno vypočítat reálnou hodnotu translace zkoumaného předmětu a_x , který způsobil pohyb struktury koherenční zrnitosti. Tento postup a vzorec (11) je základem měřicí metody korelace polí koherenční zrnitosti.

2 Experiment

V této kapitole bude již naše pozornost, v souladu s cílem bakalářské práce, věnována provedení experimentálního ověření funkčnosti patentovaného měřicího senzoru pro detekci absolutní polohy zkoumaného předmětu, který vykonává translační pohyb ve směru zvolené souřadné osy. Nejprve jsou uvedeny technické prvky (komponenty) použité při realizaci experimentu a dále představeny dvě navržené konkrétní experimentální sestavy senzoru včetně jejich geometrických a optických parametrů. Poté jsou popsány jednotlivé fáze provedení experimentu, to znamená přípravná fáze experimentu, fáze kalibrační a měřicí. Během přípravné fáze je nutné ověřit, zda pro zvolené uspořádání experimentální sestavy senzoru dostáváme požadované výsledky v daném rozsahu měření. V této fázi experimentu je rovněž otestováno, jaké minimální a maximální translace zkoumaného předmětu jsme schopni při dané experimentální sestavě reálně určit, a také je otestována funkčnost navrženého matematického software ke zpracování zaznamenaných dat.

Přípravná fáze experimentu je provedena především pro první navrženou experimentální sestavu senzoru, přičemž získané poznatky jsou částečně přeneseny i pro druhou experimentální sestavu senzoru. Po pečlivém vykonání přípravné fáze experimentu pak budou následovat další fáze experimentu, a to – kalibrační a měřicí. V kalibrační fázi experimentu budou zaznamenány do příslušné databáze jednotlivé snímky struktur koherenčních zrnitostí odpovídajících stanoveným pozicím zkoumaného předmětu na jeho pohybové trajektorii. Konečně ve fázi měřicí pak budou detekovány neznámé pozice zkoumaného předmětu na základě porovnání jejich příslušných snímků koherenčních zrnitostí se snímky uloženými v databázi pro klíčové pozice předmětu. Zpřesnění neznámé pozice zkoumaného předmětu mezi stanovenými pozicemi pak bude provedeno s využitím referenční tabulky získané v přípravné fázi experimentu pro dílčí kroky posuvu předmětu na dané trajektorii.

2.1 Technické prvky použité v experimentu

2.1.1 Detektor světelného záření

Optické detektory pracují na principu absorpce energie dopadajícího záření, které v nich vyvolává určitou reakci, například excitaci elektronu nebo změnu teploty. Detektory se dají charakterizovat spektrální citlivostí, tedy vlnovými délkami světelného záření, které jsou schopny zaznamenat. Mezi další charakteristiky patří rozlišení detektoru v pixelech. Ty bývají většinou čtvercové, je to nejvýhodnější tvar pro maximální

zaplnění prostoru. Čím více pixelů detektor má, tím přesněji je schopen určit polohu zachyceného fotonu – větší rozlišení [11].

Elektronické snímací prvky lze podle použité technologie rozdělit na CCD (Coupled Charge Device) prvky anebo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors) prvky. 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 například procesory, paměti, atd. [12]

Použitý snímač v našem experimentu je maticová CMOS kamera s monochromatickým čipem ZORAN ZR 32112 MLC, který má $1\,288 \times 1\,032$ aktivních bodů, tzv. pixelů. Rozměry každého aktivního bodu tvaru čtverce jsou $7,5 \times 7,5 \mu\text{m}^2$. Tyto aktivní body představují elementární efektivní plošky detektoru. Tento typ kamery je již poněkud zastaralý, ale pro naše účely postačující. Výrobce kamery, firma EPIX, již k danému typu černobílé kamery nemá dostupnou technickou dokumentaci, a proto je do Přílohy 1 (Obrázek Příloha 1-1 a Obrázek Příloha 1-2) této práce vložen technický list maticové CMOS kamery s barevným čipem ZORAN ZR 32112 PLC, která má stejné rozlišení a podobné parametry.

2.1.2 Translační stolek

Pro realizaci translačního pohybu tělesa je v našem experimentu využit plně automatizovaný translační stolek firmy COHERENT, který je schopen vykonávat translaci v řádech jednotek, desítek a stovek mikrometrů, přičemž maximální rozsah pohybu je až 25 milimetrů. Rozlišení stolku je $0,02 \mu\text{m}$.

Stolek je ovládán skrze speciální počítačovou kartu Encoder Driver Card spolu s dedikovaným ovládacím programem, do kterého se zadávají tzv. G-kódy. Na stejném principu jsou ovládány i NC a CNC obráběcí stroje. Z jedné počítačové karty lze ovládat až 8 samostatných pohonných jednotek (aktuátorů), které mohou mít každá vlastní rychlost, zrychlení i dráhu. Technické listy obsahující parametry pohonných jednotek (v našem experimentu je použita jednotka 37-1062) a ovládací počítačové karty jsou uvedeny v Příloze 2 (Obrázek Příloha 2-1 a Obrázek Příloha 2-2).

Pro vykonání translace stolku je nutné v ovládacím programu definovat, která pohonná jednotka je v daném okamžiku připojena, nastavit zrychlení a rychlost pohybu a také vzdálenost, kterou má translační stolek se zkoumaným předmětem urazit. Veškeré tyto určené hodnoty jsou kvantovány a před zadáním příslušného kódu se musí přepočítat na tzv. pulsy (counts), ve kterých translační stolek operuje. Toto je možné nastavit ve speciálním příkazovém řádku přímo v obslužném programu. Seznam v našem experimentu využitých G-kódů a jejich vysvětlení pak lze nalézt v Příloze 3.

2.2 Volba experimentální sestavy senzoru

Jak je možné vyčíst ze vzorce (11) v měřicí metodě korelace polí koherenční zrnitosti, geometrické parametry optické sestavy hrají zásadní roli pro přepočítání posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x , který odpovídá reálné translaci tělesa a_x . Při volbě konkrétních geometrických parametrů sestavy senzoru je kladen důraz na dvě věci. Jednak je nutné brát ohled na rozměry samotného optického stolu a také jisté omezení plochy na něm i vůči jiným experimentům, které na optickém stole probíhají. A dále je důležité navrhnout takové uspořádání sestavy měřicího senzoru, aby byl přepočítání posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x odpovídající translaci předmětu a_x ve směru souřadné osy x sobě rovný nebo rovný jeho celočíselnému násobku.

Nakonec byly zvoleny takové geometrické a optické parametry experimentální sestavy senzoru (konkrétně vzdálenosti předmětu od detektoru L_o a od bodového zdroje L_s , úhly směrů pozorování θ_o a osvětlení θ_s , ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky f a vlnová délka laserového svazku λ), pro které posuv struktury koherenční zrnitosti A_x o jeden pixel (px) použitého snímače detektoru odpovídal translaci zkoumaného předmětu a_x o dva mikrometry (experimentální sestava č. 1 – viz Tabulka 1) nebo o jeden mikrometr (experimentální sestava č. 2 – viz Tabulka 2).

Tabulka 1: Geometrické a optické parametry experimentální sestavy č. 1 senzoru pro případ, že posuv struktury koherenční zrnitosti $A_x = 1$ px odpovídá reálné translaci zkoumaného předmětu $a_x = 2\mu\text{m}$. Jednotlivé veličiny reprezentují vlnovou délku laserového svazku λ , pixel použitého snímače detektoru p , vzdálenosti předmětu od detektoru L_o a bodového zdroje L_s , úhly směrů pozorování θ_o a osvětlení θ_s a ohniskovou vzdálenost f osvětlovací čočky.

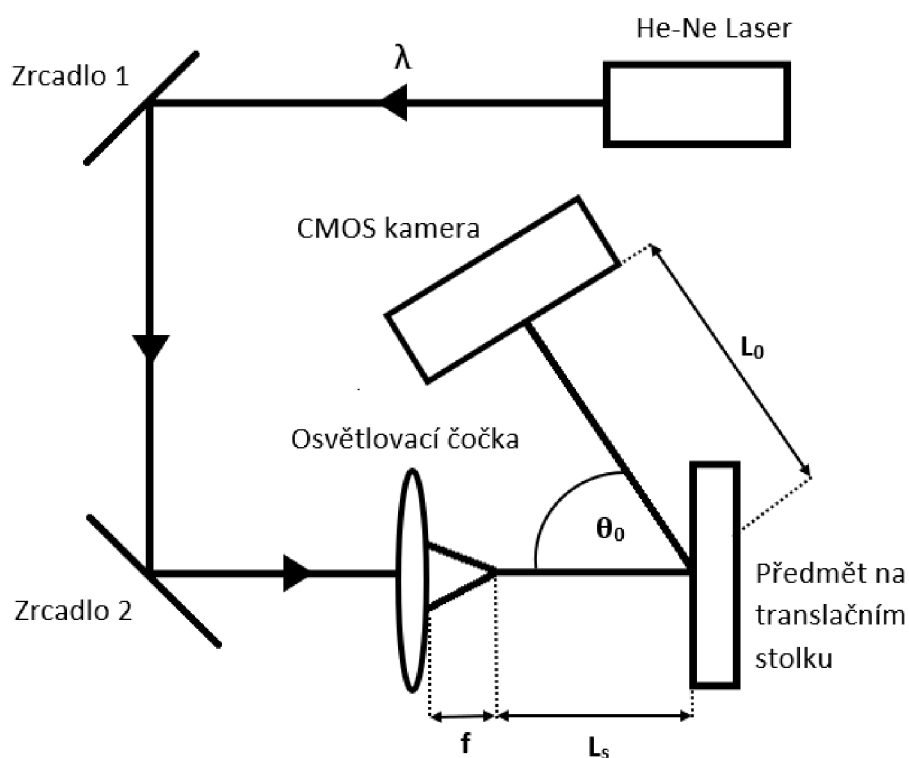
λ [nm]	p [μm]	L_o [m]	L_s [m]	θ_o [°]	θ_s [°]	f [mm]
632,8	7,5	0,490	0,190	25	0	75

Tabulka 2: Geometrické a optické parametry experimentální sestavy č. 2 senzoru pro případ, že posuv struktury koherenční zrnitosti $A_x = 1$ px odpovídá reálné translaci zkoumaného předmětu $a_x = 1\mu\text{m}$. Jednotlivé veličiny reprezentují vlnovou délku laserového svazku λ , pixel použitého snímače detektoru p , vzdálenosti předmětu od detektoru L_o a bodového zdroje L_s , úhly směrů pozorování θ_o a osvětlení θ_s a ohniskovou vzdálenost f osvětlovací čočky.

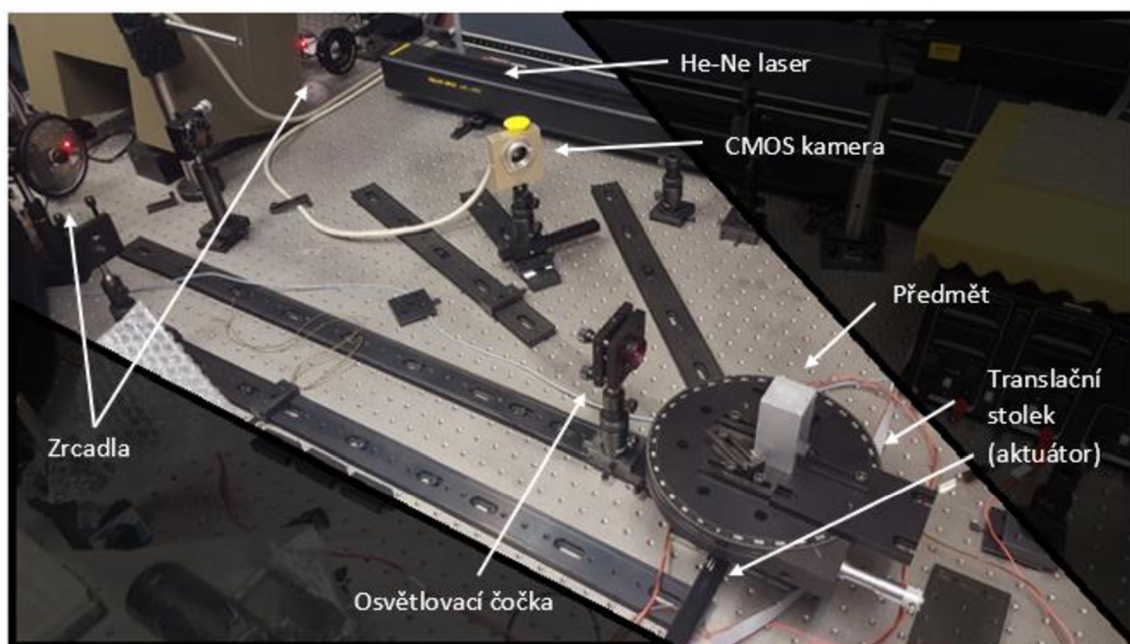
λ [nm]	p [μm]	L_o [m]	L_s [m]	θ_o [°]	θ_s [°]	f [mm]
632,8	7,5	0,507	0,089	31	0	35

Při pohledu na obě tabulky je důležité upozornit, že v experimentální sestavě č. 2 bylo nutné kromě geometrických parametrů také změnit použitou osvětlovací čočku. Toto bylo učiněno z důvodu zajištění přibližně stejné velikosti zrn (skvrn) v detekované struktuře koherenční zrnitosti pro obě experimentální sestavy senzoru. Takzvaně „správná“ velikost skvrn ve struktuře koherenční zrnitosti je významná pro přesný výpočet normované korelační funkce intenzit v porovnávaných snímcích koherenčních zrnitostí. Větší zrna, a tedy neostré píky v intenzitním signálu zvoleného řádku snímku koherenční zrnitosti mohou způsobit nepřesné určení velikosti a pozice maxima normované korelační funkce.

Pro porovnání a ověření funkčnosti a přesnosti měřicího senzoru bude experiment proveden pro obě navržené experimentální sestavy. Obecné schéma experimentální sestavy je ilustračně znázorněno na Obrázku 9. Fotografii reálné experimentální sestavy senzoru pak lze vidět na Obrázku 10.



Obrázek 9: Obecné schéma experimentální sestavy senzoru včetně vyznačení geometrických a optických parametrů – vzdálenosti předmětu od detektoru L_o a od bodového zdroje L_s , úhel směru pozorování θ_0 , ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky f a vlnová délka použitého laserového svazku λ .



Obrázek 10: Fotografie reálné experimentální sestavy senzoru na optickém stole.

2.3 Experiment č. 1

2.3.1 Přípravná fáze experimentu

Jak již bylo řečeno, cílem v přípravné fázi experimentu je zjistit, zda jsme schopni pro zvolené uspořádání experimentální sestavy č. 1 senzoru detekovat požadované výsledky měření translace zkoumaného předmětu v daném rozsahu měření. A dále se pokusíme určit, jaké minimální a maximální translace zkoumaného předmětu jsme schopni reálně rozlišit. Tyto výsledky by se následně měli stát zdrojem pro sestavení tzv. referenční tabulky, která nám v měřicí fázi experimentu pomůže upřesnit hledanou neznámou absolutní translaci zkoumaného předmětu.

Na začátku přípravné fáze experimentu je tedy nutné vybrat krok, s jakým budeme předmětem pohybovat. Nejprve provedeme opakovanou translaci zkoumaného předmětu s krokem 10 mikrometrů. Těto translaci by dle metody korelace polí koherenční zrnitosti, vzorec (11), měl odpovídat posuv struktury koherenční zrnitosti o 5 pixelů použitého snímače. Dosažené výsledky měření jsou prezentovány v Tabulce 3. V prvním sloupci tabulky jsou uvedeny nastavené reálné hodnoty translace stolku $a_{x,real}$ se zkoumaným předmětem, ve druhém sloupci tabulky jsou pak uvedeny detekované hodnoty posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x vypočtené pomocí normované korelační funkce, vzorec (15), kde A_x odpovídá pozici maxima této korelační funkce Δx . Velikost maxima (stupeň vzájemné korelace intenzit) $r_{1,2}$ je pak uvedena ve třetím sloupci tabulky. Konečně ve čtvrtém sloupci tabulky je uveden výsledek naměřené translace

zkoumaného předmětu a_x metodou korelace polí koherenční zrnitosti vypočtený podle vzorce (11).

Uvedme ještě poznámku k výpočtu normované korelační funkce. V Tabulce 3 jsou korelovány vždy snímky koherenčních zrnitostí odpovídající pozici provedené translace předmětu se snímkem koherenční zrnitosti odpovídající výchozí pozici předmětu. To znamená, že jsou korelovány snímky koherenčních zrnitostí nultý a první, nultý a druhý, nultý a třetí až nultý a desátý. Konkrétně jsou korelovány intenzity ve zvolených řádcích těchto snímků.

Samotný postup měření v přípravné fázi experimentu je následující. Na začátku je odstraněn mrtvý chod translačního stolku a poté je ve výchozí pozici zaznamenán na CMOS kameře nultý snímek struktury koherenční zrnitosti. Následně je translační stolek posunut o 10 mikrometrů a po dosažení této pozice je zaznamenán první snímek struktury koherenční zrnitosti. Takto je opakovaně postupováno, až je stolek posunut o celkovou vzdálenost 100 mikrometrů a je zaznamenán desátý snímek struktury koherenční zrnitosti. Pohyb translačního stolku je zajištěn pomocí řídicího programu, jehož některé skripty jsou pro ilustraci uvedeny v Příloze 3 práce.

V Tabulce 3 můžeme pozorovat, že translace předmětu s krokem 10 mikrometrů jsou pro naše účely příliš malé, neboť velikost stupně vzájemné korelace snímků struktur koherenčních zrnitostí je téměř totožná pro jednotlivé translace předmětu. Tento vybraný krok je tedy nevhodný a nelze jednoznačně určit pozice předmětu ze vzájemné korelace snímků struktur koherenčních zrnitostí. Pro výpočet vzájemné korelace snímků struktur koherenčních zrnitostí byl vytvořen skript v matematickém software Octave (viz Příloha 8.4, část A).

Protože se translace zkoumaného předmětu s krokem 10 mikrometrů ukázala jako nevýhodná, zvětšíme hodnotu tohoto kroku na 20 mikrometrů a předmět bude posunut o celkovou vzdálenost 400 mikrometrů. Dosažené naměřené výsledky jsou pak prezentovány v Tabulce 4. Význam jednotlivých sloupců Tabulky 4 je stejný jako u Tabulky 3. Jak můžeme vidět, tento krok již vypadá jako dostatečný pro rozlišení jednotlivých snímků struktur koherenčních zrnitostí, kdy dochází k očekávanému snížení podobnosti snímků s rostoucí vzdáleností translace předmětu. Z tabulky také vyplývá, že translace zkoumaného předmětu o každých 100 mikrometrů odpovídá snížení stupně vzájemné korelace $r_{1,2}$ o zhruba 2,5 %.

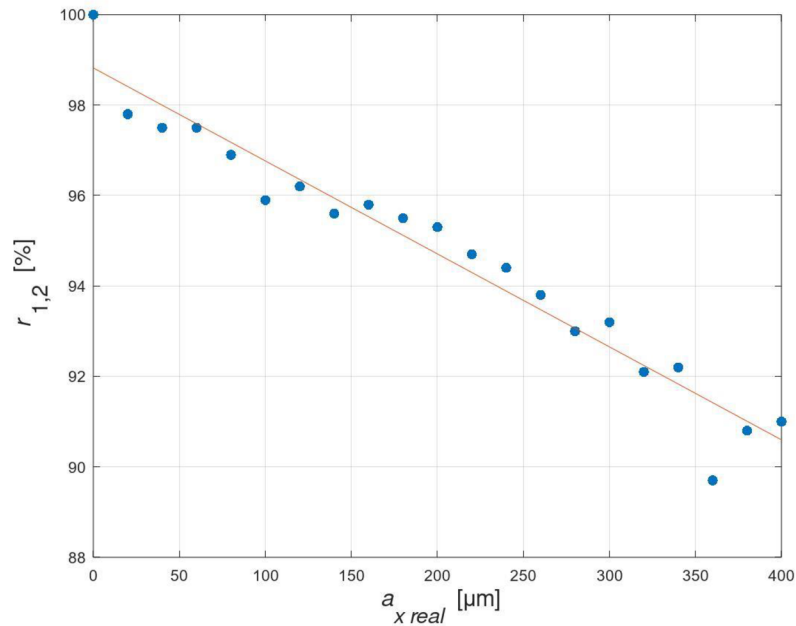
Tento poznatek využijeme při ověření funkčnosti patentovaného senzoru, když v měřicí fázi budeme hledat neznámou pozici absolutní translace zkoumaného předmětu s omezenou minimální přesností na 100 mikrometrů, a to jen ze vzájemné podobnosti dvou zaznamenaných snímků struktur koherenčních zrnitostí. V grafu na Obrázku 11 je zobrazen pokles stupně vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí se vzrůstající vzdáleností provedené translace předmětu, které odpovídají datům Tabulky 4. Po proložení přímkou je zřejmé, že pokles lze aproximovat jako lineární.

Tabulka 3: Reálné posuvy translačního stolku $a_{x\text{-real}}$, jim odpovídající detekované hodnoty posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x včetně stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ a naměřené velikosti translace zkoumaného předmětu a_x pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti. Translační pohyb předmětu s krokem 10 mikrometrů.

$a_{x\text{-real}} [\mu\text{m}]$	$A_x [\text{px}]$	$r_{1,2} [\%]$	$a_x [\mu\text{m}]$
0	0	100,0	0
10	5	98,5	10
20	10	98,2	20
30	15	97,9	30
40	20	97,9	40
50	25	97,9	50
60	30	98,0	60
70	35	97,9	70
80	40	97,6	80
90	45	97,4	90
100	50	97,3	100

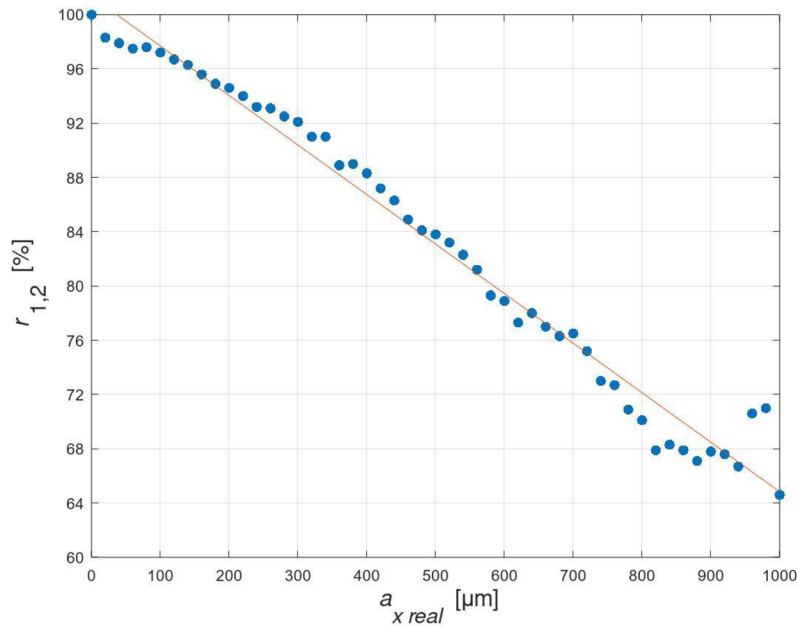
Tabulka 4: Reálné posuvy translačního stolku $a_{x\text{-real}}$, jim odpovídající detekované hodnoty posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x včetně stupně vzájemné korelace snímků $r_{1,2}$ a naměřené velikosti translace zkoumaného předmětu a_x pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti. Translační pohyb předmětu s krokem 20 mikrometrů.

$a_{x\text{-real}} [\mu\text{m}]$	$A_x [\text{px}]$	$r_{1,2} [\%]$	$a_x [\mu\text{m}]$
0	0	100,0	0,0
20	10	97,8	20,0
40	20	97,5	40,0
60	30	97,5	60,0
80	40	96,9	80,0
100	50	95,9	100,0
120	60	96,2	119,9
140	70	95,6	139,9
160	80	95,8	159,9
180	90	95,5	179,9
200	100	95,3	199,9
220	110	94,7	219,9
240	120	94,4	239,9
260	130	93,8	259,9
280	140	93,0	279,9
300	150	93,2	299,9
320	160	92,1	319,8
340	170	92,2	339,8
360	180	89,7	359,8
380	190	90,8	379,8
400	200	91,0	399,8



Obrázek 11: Graf závislosti poklesu stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů. Proložení dat přímkou s funkcí $y = -0,0206x + 98,8212$ ukazuje, že pokles lze aproximovat jako lineární.

Pokračujeme-li v měření dále se stejným krokem translace zkoumaného předmětu (tedy 20 mikrometrů) až do celkové vzdálenosti 1000 mikrometrů, můžeme dosažené výsledky translace předmětu prezentovat graficky, viz Obrázku 12. V grafu lze pozorovat, že při translačním pohybu předmětu dochází k pozvolnému (přibližně lineárnímu) poklesu normované korelační funkce. Při přiblížení se k celkové translaci 1000 mikrometrů ovšem už dochází k výraznému rozladění. Tento jev nastává v důsledku způsobu vyhodnocování dat. Při výpočtu normované korelační funkce intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí dle vzorce (15) dochází ke stálému zmenšování rozsahu datového souboru při rostoucí vzdálenosti předmětu od jeho výchozí polohy. Pro výpočet normované korelační funkce je z důvodu přesnosti doporučeno mít maximální posuv struktury koherenční zrnitosti v rozsahu 0,1násobku (nebo výjimečně i 0,2násobku) počtu pixelů jednoho řádku použité CMOS kamery [9], což v našem případě znamená 129 pixelů (resp. 258 pixelů). V případě užití experimentální sestavy č. 1 by to znamenalo provést maximální translaci předmětu 500 mikrometrů od jeho výchozí pozice a tuto hodnotu také využijeme při ověřování funkčnosti senzoru.



Obrázek 12: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace 1000 mikrometrů. Proložení dat přímkou s funkcí $y = -0,0365 x + 101,3422$ ukazuje, že pokles lze aproximovat jako lineární.

Znovu si připomeňme, že cílem práce je ověřit funkčnost patentovaného senzoru, tj. že jsme schopni určit absolutní polohu předmětu, který je vystaven translačnímu pohybu, a to pouze pomocí porovnávání snímků struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných pro známé pozice předmětu a hledanou pozici předmětu. Musíme si proto také stanovit vhodný maximální translační krok pro známé pozice na trajektorii pohybujícího se předmětu ve směru souřadné osy x . Z dosud provedené přípravné fáze experimentu vyplývá, že pro experimentální sestavu č. 1 je ideální mít tento maximální krok 500 mikrometrů. Jako minimální měřicí krok pro stanovení neznámé polohy předmětu se naopak jeví jako optimální hodnota translace 100 mikrometrů.

Protože zkoumaný předmět může být od své výchozí nebo ostatních známých pozic na trajektorii posunut buď vlevo, nebo vpravo, je nutné ještě opakovaně provést v rámci přípravné fáze experimentu měření s celkovým rozsahem translace 1000 mikrometrů (± 500 mikrometrů) a s krokem 20 mikrometrů. To znamená provést v každém měření 51 měřicích kroků, kde jako výchozí pozice předmětu bude považována prostřední, 25. pozice předmětu. To také znamená, že budeme korelovat snímky struktur koherenčních zrnitostí postupně v tomto pořadí: 25. a 24., 25. a 23. až 25. a nultý na jednu stranu od výchozí pozice předmětu (doleva), poté na druhou stranu od této pozice (doprava) korelovat snímky koherenčních zrnitostí 25. a 26., 25. a 27. až 25. a 50. Opět

je očekáván pokles normované korelační funkce s rostoucím translačním pohybem předmětu. Tento pokles by měl být na obě strany symetrický.

Měření je provedeno (opakováno) celkem třikrát a výsledná data jsou pak zprůměrována. Výsledky měření jsou prezentovány v Tabulce 5. V prvním sloupci tabulky je uveden reálný posuv translačního stolku a_{x-real} , ve druhém, třetím a čtvrtém sloupci tabulky jsou uvedeny vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$, $r_{2,2}$ a $r_{3,2}$ prostředního, tedy 25. snímku struktury koherenční zrnitosti s ostatními snímky struktur koherenčních zrnitostí pro první, druhé a třetí měření. Konečně v pátém sloupci tabulky $rp_{1,2}$ reprezentuje průměrný stupeň vzájemné korelace intenzit. Červenou barvou je pro lepší orientaci v tabulce vyznačena nulová pozice zkoumaného předmětu.

Tabulka 5: Reálný posuv translačního stolku a_{x-real} . Vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$, $r_{2,2}$ a $r_{3,2}$ prostředního (25.) snímku struktury koherenční zrnitosti s ostatními snímky struktur koherenčních zrnitostí pro jednotlivá opakovaná měření a průměrný stupeň vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$. Pro lepší orientaci je výchozí pozice předmětu vyznačena červenou barvou.

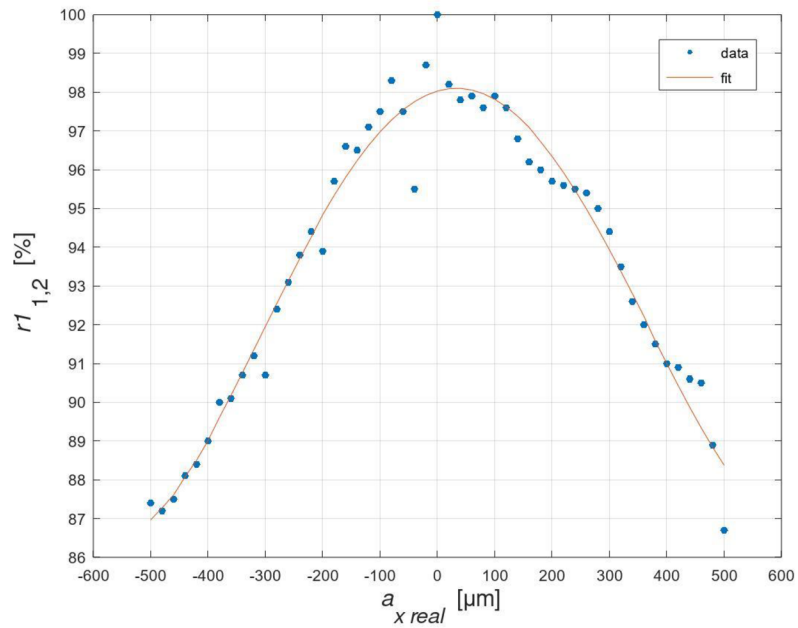
$a_{x-real} [\mu m]$	$r_{1,2} [\%]$	$r_{2,2} [\%]$	$r_{3,2} [\%]$	$rp_{1,2} [\%]$
-250	87,4	86,5	86,6	86,8
-240	87,2	87,2	87,5	87,3
-230	87,5	88,0	88,3	87,9
-220	88,1	88,3	89,2	88,5
-210	88,4	88,9	89,5	88,9
-200	89,0	89,1	90,2	89,4
-190	90,0	89,5	90,2	89,9
-180	90,1	90,1	91,2	90,5
-170	90,7	91,3	91,9	91,3
-160	91,2	90,9	91,2	91,1
-150	90,7	90,7	91,3	90,9
-140	92,4	92,3	93,3	92,7
-130	93,1	93,4	94,1	93,5
-120	93,8	93,8	94,5	94,0
-110	94,4	94,6	95,0	94,7
-100	93,9	94,4	94,6	94,3
-90	95,7	95,8	96,2	95,9
-80	96,6	96,2	96,3	96,4
-70	96,5	96,4	96,9	96,6
-60	97,1	97,3	97,3	97,2
-50	97,5	97,7	97,6	97,6
-40	98,3	98,4	98,1	98,3
-30	97,5	97,3	97,3	97,4
-20	95,5	95,6	95,6	95,6
-10	98,7	98,8	98,9	98,8
0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	98,2	98,3	98,3	98,3
20	97,8	98,0	98,0	97,9

30	97,9	98,0	98,0	98,0
40	97,6	97,7	97,6	97,6
50	98,0	97,8	97,7	97,8
60	97,6	97,7	97,5	97,6
70	96,8	97,1	97,0	97,0
80	96,2	96,6	96,2	96,3
90	96,0	96,2	96,0	96,1
100	95,7	96,0	95,9	95,9
110	95,6	95,8	95,4	95,6
120	95,5	95,6	95,0	95,4
130	95,4	95,3	94,8	95,2
140	95,0	95,0	94,7	94,9
150	94,4	94,9	94,5	94,6
160	93,5	94,0	93,5	93,7
170	92,6	92,8	93,0	92,8
180	92,0	92,7	92,1	92,3
190	91,5	91,7	91,0	91,4
200	91,0	91,4	90,8	91,1
210	90,9	91,4	90,7	91,0
220	90,6	91,2	90,2	90,7
230	90,5	90,7	89,5	90,2
240	88,9	88,5	87,6	88,3
250	86,7	87,6	86,8	87,0

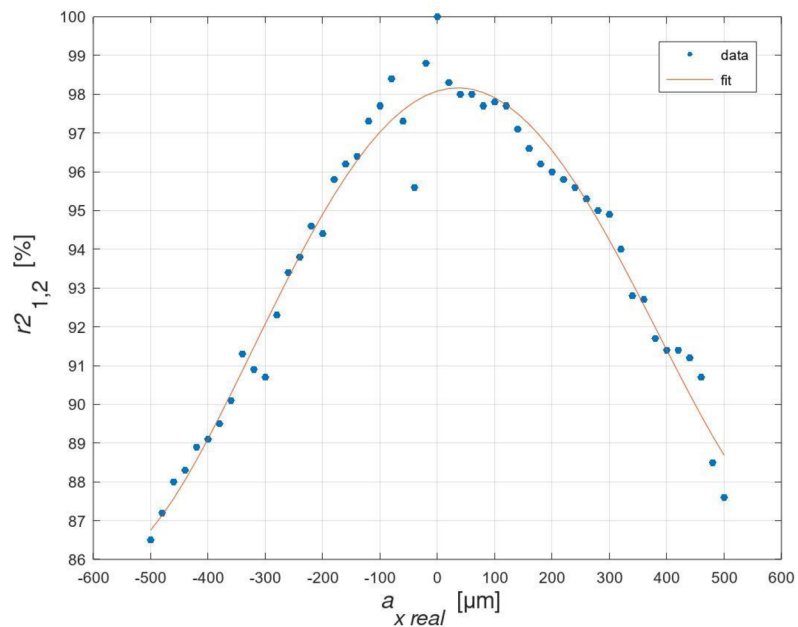
Z tabulky 5 můžeme vyčíst, že dochází k pravidelnému poklesu normované korelační funkce na obě strany od výchozí pozice předmětu přesně dle očekávání. Je také vidět pěkná reprodukovatelnost měření, tj. že nedochází k výrazným odchylkám mezi jednotlivými měřeními, ačkoli byla opakována s časovým odstupem dvou týdnů.

Pokud jde o samotný postup měření, tento je již plně automatizován. Za tímto účelem je využit program poskytnutý pracovištěm Společné laboratoře optiky, který řídí a synchronizuje pohyb translačního stolku se snímáním struktur koherenčních zrnitostí na CMOS kameru v přesně definovaných pozicích předmětu na jeho pohybové trajektorii o délce 1000 mikrometrů (± 500 mikrometrů) a s krokem 20 mikrometrů.

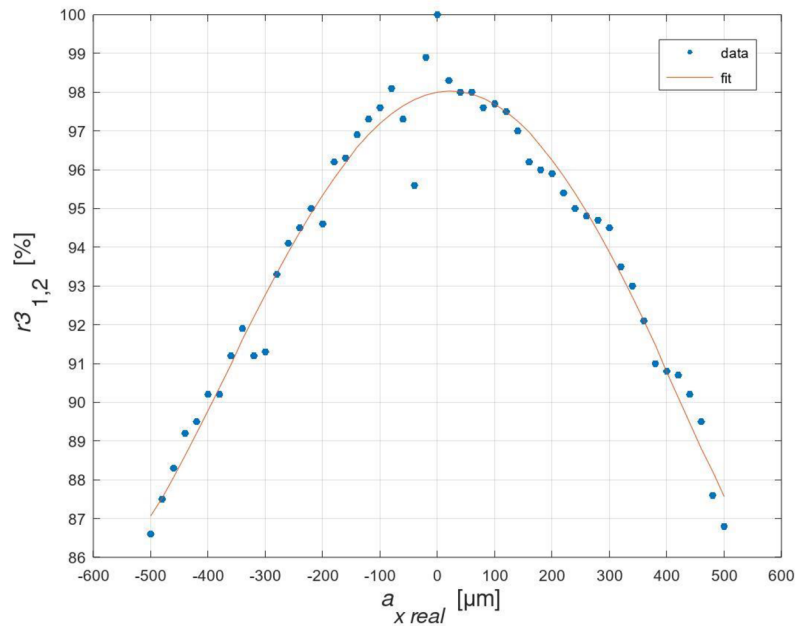
Výsledky opakovaných měření uvedené v Tabulce 5 jsou rovněž prezentovány graficky na Obrázku 13 (první měření), Obrázku 14 (druhé měření) a Obrázku 15 (třetí měření). Data v jednotlivých grafech jsou interpolována (fitována) vhodným polynomem dle metody nejmenších čtverců. Zde se ukázal jako nejvhodnější polynom 4. stupně. Tento polynom je pak zdrojem pro vytvoření tzv. referenční tabulky, která bude využita při měřicí fázi experimentu pro stanovení neznámé pozice absolutní translace zkoumaného předmětu. Skript pro interpolaci naměřených dat polynomem 4. stupně vytvořený v software Octave je uveden v Příloze 4, část B.



Obrázek 13: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 500 mikrometrů pro první měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.



Obrázek 14: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{2,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 500 mikrometrů pro druhé měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.



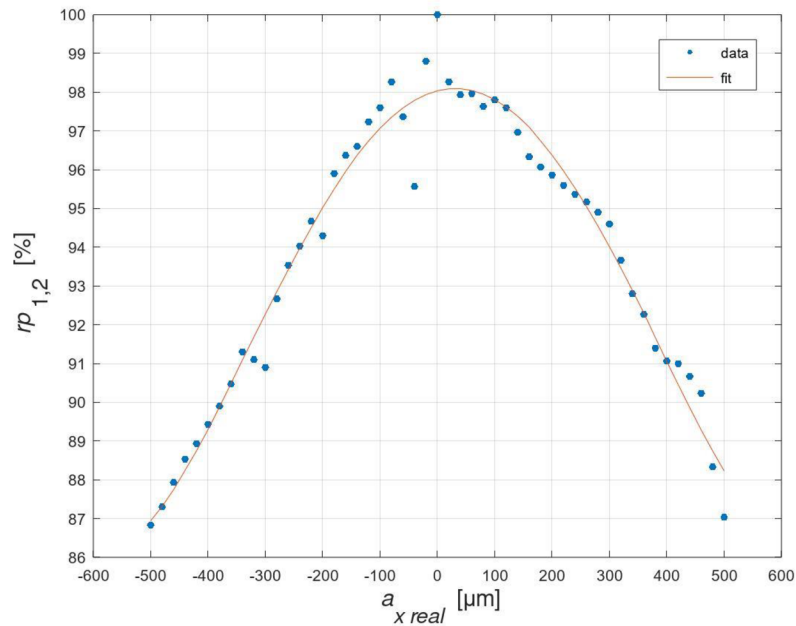
Obrázek 15: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{3,1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 500 mikrometrů pro třetí měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.

V grafech na Obrázcích 13-15 lze vidět, že normovaná korelační funkce klesá téměř symetricky na obě strany od výchozí pozice zkoumaného předmětu. Všechny tři grafy jsou si velmi podobné, i drobné odchylky, například pokles stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ pro translaci předmětu o 40 mikrometrů nalevo od jeho výchozí pozice, se stále opakují. Výstupní data všech těchto tří opakovaných měření, která představují dobrou reprodukovatelnost experimentu, jsou zprůměrována a opět interpolována pomocí polynomu 4. stupně (viz graf na Obrázku 16).

Jak již bylo uvedeno, průměrná naměřená data stupně vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$ pro pozice reálné translace předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 500 mikrometrů ze tří opakovaných měření jsou proložena polynomem 4. stupně. Přesné hodnoty všech koeficientů u jednotlivých exponentů proměnné x tohoto polynomu jsou prezentovány v Tabulce 6. Vzhledem k tomu, že při interpolaci naměřených dat pomocí polynomu se nedostaneme do nejvyšší hodnoty (100 %), lze při následném ověření funkčnosti senzoru považovat stupeň vzájemné korelace intenzit větší než 98 % za výchozí pozici zkoumaného předmětu.

Tabulka 6: Vypočtené koeficienty C_1 , C_2 , C_3 , C_4 a C_5 jednotlivých exponentů proměnné x polynomu 4. stupně, který interpoluje průměrná naměřená data z opakovaných měření.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$7,5905 \cdot 10^{-11}$	$-9,8385 \cdot 10^{-9}$	$-6,0566 \cdot 10^{-5}$	$3,7775 \cdot 10^{-3}$	98,036



Obrázek 16: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 500 mikrometrů. Jedná se o průměr dat z třech opakovaných měření prezentovaných na Obrázku 13-15. Zprůměrovaná data jsou interpolována polynommem 4. stupně.

Nalezený analytický tvar polynomu 4. stupně interpolující naše zprůměrovaná naměřená data

$$y = 7,5905 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 9,8385 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 6,0566 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3,7775 \cdot 10^{-3} \cdot x + 98,036 \quad (16)$$

je zdrojem pro vytvoření tzv. referenční tabulky (viz Tabulka 7), která bude využita při měřicí fázi experimentu ověřující funkčnost senzoru, a tedy pro stanovení neznámé pozice absolutní translace zkoumaného předmětu. Tabulka 7 představuje hlavní výsledek přípravné fáze experimentu č. 1 a bude nedílnou součástí databáze při porovnávání stupňů vzájemné korelace intenzit získaných korelací snímků struktur koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu v měřicí fázi experimentu se snímky zaznamenanými pro známé pozice translace předmětu v kalibrační fázi experimentu. S touto tabulkou jsme schopni určit hledanou, neznámou, pozici zkoumaného předmětu na obě strany od známé pozice předmětu.

Tabulka 7: Referenční tabulka získaná na základě výpočtu nalezeného polynomu 4. stupně, rovnice (16), v přípravné fázi experimentu č. 1. Reálné pozice translace předmětu $a_{x \text{ real}}$ a jim odpovídající hodnoty stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ jsou v závislosti na rostoucí velikosti translace předmětu na obě strany od jeho výchozí pozice.

$a_{x \text{ real}} [\mu\text{m}]$	$r_{1,2} [\%]$
-500	87,0
-400	89,4
-300	92,3
-200	95,1
-100	97,1
0	98,0
100	97,8
200	96,4
300	94,1
400	91,2
500	88,3

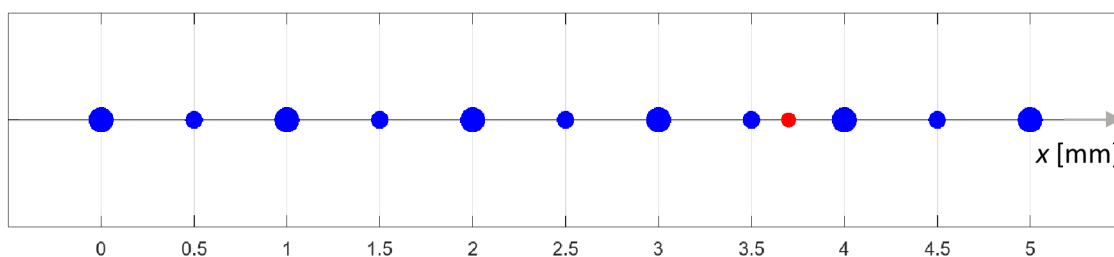
2.3.2 Kalibrační fáze

Prezentovaný experiment ověřující funkčnost patentovaného senzoru je rozdělen do dvou základních fází. V první fázi, která je nazvána kalibrační, je vytvořena databáze snímků struktur koherenčních zrnitostí pro danou trajektorii translačního pohybu předmětu. Pro naši experimentální sestavu č. 1 byla zvolena trajektorie ve směru souřadné osy x o celkové vzdálenosti 5 milimetrů od výchozí pozice zkoumaného předmětu. Jako klíčové pozice, modré body v Obrázku 17, trajektorie zkoumaného předmětu jsou zvoleny pozice každých 500 mikrometrů na dané trajektorii. To znamená, že pro tyto pozice zaznamenáme do databáze snímky struktur koherenčních zrnitostí. Tato maximální vzdálenost by měla být, jak je ukázáno v přípravné fázi experimentu, spolehlivá pro určení pozice předmětu. Celkem je na zvolené trajektorii tedy zaznamenáno 11 snímků struktur koherenčních zrnitostí. Situaci ilustruje Obrázek 17.

2.3.3 Měřicí fáze

V této fázi experimentu obdržíme čtveřici snímků struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných pro neznámé pozice předmětu, který se pohybuje na dané trajektorii ve směru souřadné osy x o celkové vzdálenosti 5 milimetrů od výchozí pozice

zkoumaného předmětu. Tyto snímky pak porovnáváme se snímky koherenčních zrnitostí uloženými v databázi během kalibrační fáze experimentu. Je očekáváno, že neznámá pozice předmětu, viz červený bod na Obrázku 17, se bude nacházet mezi dvěma známými pozicemi (modrými body), s jejichž snímky koherenčních zrnitostí bude mít příslušný snímek koherenční zrnitosti nejvyšší podobnost. V závislosti na vypočteném stupni vzájemné korelace intenzit snímků koherenčních zrnitostí dle referenční tabulky (Tabulka 7) a grafu na Obrázku 16 nakonec určíme neznámou pozici předmětu s přesností na desetinu milimetru, tedy sto mikrometrů.



Obrázek 17: Modré puntíky reprezentují pozice na trajektorii translačního pohybu zkoumaného předmětu ve směru souřadné osy x s krokem 500 mikrometrů o celkové vzdálenosti 5 milimetrů. Pro tyto pozice předmětu jsou do databáze zaznamenány snímky struktur koherenčních zrnitostí. Červeně je vyznačena neznámá pozice předmětu, která je detekována v měřicí fázi experimentu.

2.4 Experiment č. 2

2.4.1 Přípravná fáze

U experimentu č. 2 již není nutné provádět v jeho přípravné fázi všechna měření pro stanovení minimálního a maximálního kroku translace zkoumaného předmětu, jako tomu bylo u experimentu č. 1, protože je možné využít poznatky vyvozené právě z tohoto již provedeného experimentu. Experimentální sestava č. 2 má vůči experimentální sestavě č. 1 poloviční přepočít, což znamená, že posuvu struktury koherenční zrnitosti A_x o jeden pixel odpovídá translace zkoumaného předmětu a_x o jeden mikrometr. Proto bude zvolena v přípravném měření pro vytvoření referenční tabulky poloviční jak celková vzdálenost translace předmětu, tedy 500 mikrometrů (± 250 mikrometrů na obě strany od výchozí pozice předmětu), tak i minimální krok, s jakým budeme předmětem pohybovat, tedy 10 mikrometrů. Zároveň zůstane zachována i podmínka pro maximální posuv struktury koherenční zrnitosti, který by neměl přesahovat 0,2 násobek počtu pixelů použité CMOS kamery.

Optimální měřicí krok, během kterého jsme schopni spolehlivě rozlišit dvě různé pozice translace předmětu, se pak také sníží v experimentální sestavě č. 2 na polovinu, tedy na 50 mikrometrů. Tento krok následně využijeme při sestavování referenční tabulky jako hlavního výsledku přípravné fáze experimentu.

Analogickým způsobem jako v experimentu č. 1 je proto vykonáno v přípravné fázi experimentu č. 2 měření translačního pohybu předmětu v celkovém rozsahu translace předmětu 500 mikrometrů (± 250 mikrometrů) s krokem 10 mikrometrů. To znamená, že v rámci měření je provedeno 51 měřicích kroků, kde jako výchozí pozice předmětu je znovu uvažována prostřední, 25. pozice předmětu na jeho dané trajektorii. Odpovídající, 25. snímek struktury koherenční zrnitosti je tedy korelován se všemi ostatními snímky ve stejném pořadí jako v předchozím experimentu.

Měření v přípravné fázi je opět třikrát opakováno a výsledná data zprůměrována. Výsledky měření jsou prezentovány v Tabulce 8. V prvním sloupci tabulky je uveden reálný posuv translačního stolku a_{x-real} , ve druhém, třetím a čtvrtém sloupci tabulky jsou uvedeny vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$, $r_{2,2}$ a $r_{3,2}$ prostředního, 25. snímku struktury koherenční zrnitosti s ostatními snímky struktur koherenčních zrnitostí pro první, druhé a třetí měření. $rp_{1,2}$ zde reprezentuje průměrný stupeň vzájemné korelace, který je uveden v pátém sloupci tabulky. Červenou barvou je pro lepší orientaci v tabulce vyznačena nulová pozice zkoumaného předmětu.

Tabulka 8: Reálný posuv translačního stolku a_{x-real} . Vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$, $r_{2,2}$ a $r_{3,2}$ prostředního (25.) snímku struktury koherenční zrnitosti s ostatními snímky struktur koherenčních zrnitostí pro jednotlivá opakovaná měření a průměrný stupeň vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$. Pro lepší orientaci je výchozí pozice předmětu vyznačena červenou barvou.

a_{x-real} [μm]	$r_{1,2}$ [%]	$r_{2,2}$ [%]	$r_{3,2}$ [%]	$rp_{1,2}$ [%]
-250	92,5	92,4	92,4	92,4
-240	92,6	92,7	92,4	92,6
-230	89,4	89,6	89,6	89,5
-220	92,7	92,5	92,5	92,6
-210	94,0	93,8	93,6	93,8
-200	93,7	93,5	93,6	93,6
-190	94,0	93,9	93,9	93,9
-180	94,5	94,4	94,3	94,4
-170	94,5	94,6	94,4	94,5
-160	93,5	93,6	93,6	93,6
-150	93,4	93,6	93,5	93,5
-140	94,1	94,1	94,1	94,1
-130	94,7	94,8	94,8	94,8
-120	95,5	95,6	95,5	95,5
-110	95,8	95,8	95,7	95,8
-100	95,7	95,6	95,6	95,6
-90	96,5	96,5	96,6	96,5

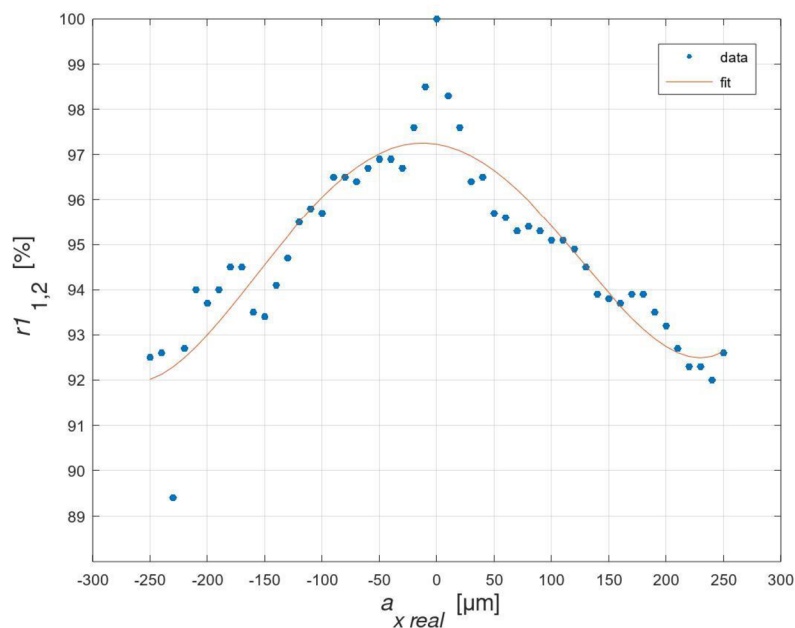
-80	96,5	96,5	96,4	96,5
-70	96,4	96,3	96,1	96,3
-60	96,7	96,7	96,7	96,7
-50	96,9	97,0	96,8	96,9
-40	96,9	96,8	96,7	96,8
-30	96,7	96,5	96,6	96,6
-20	97,6	97,7	97,6	97,6
-10	98,5	98,4	98,4	98,4
0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	98,3	98,2	98,2	98,2
20	97,6	97,7	97,6	97,6
30	96,4	96,6	96,5	96,5
40	96,5	96,4	96,3	96,4
50	95,7	95,8	95,8	95,8
60	95,6	95,5	95,7	95,6
70	95,3	95,2	95,2	95,2
80	95,4	95,1	95,2	95,2
90	95,3	95,1	95,1	95,2
100	95,1	95,0	94,8	95,0
110	95,1	95,0	94,9	95,0
120	94,9	94,8	94,8	94,8
130	94,5	94,4	94,5	94,5
140	93,9	93,9	93,8	93,9
150	93,8	93,7	93,7	93,7
160	93,7	93,5	93,5	93,6
170	93,9	93,6	93,7	93,7
180	93,9	93,4	93,6	93,6
190	93,5	93,2	93,2	93,3
200	93,2	92,8	92,9	93,0
210	92,7	92,8	92,6	92,7
220	92,3	92,3	92,2	92,3
230	92,3	92,3	92,3	92,3
240	92,0	91,7	91,7	91,8
250	92,6	92,4	92,5	92,5

Z tabulky 8 lze vyčíst, že dochází k pravidelnému poklesu korelační funkce na obě strany od výchozí pozice předmětu přesně dle očekávání. Je také opět vidět dosažená reprodukovatelnost měření, tj. že nedochází k výrazným odchylkám mezi jednotlivými měřeními.

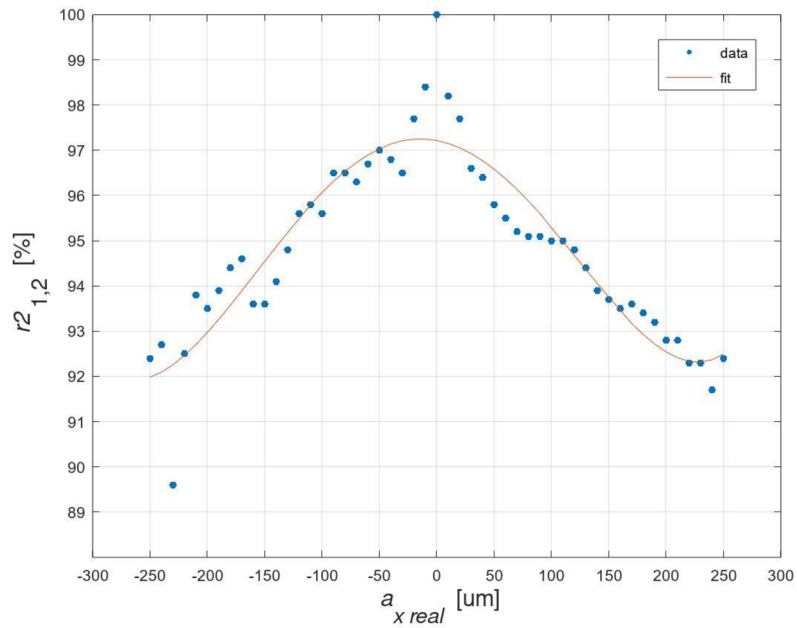
Stejně jako v experimentu č. 1 je i zde proces měření plně automatizován za využití programu Společné laboratoře optiky. Tento program zajišťuje synchronizované zaznamenávání snímků struktur koherenčních zrnitostí v přesně definovaných pozicích předmětu během jeho translačního pohybu o délce 500 mikrometrů (± 250 mikrometrů) s krokem 10 mikrometrů.

Výsledky opakovaných měření uvedené v Tabulce 8 jsou rovněž prezentovány graficky na Obrázku 18 (první měření), Obrázku 19 (druhé měření) a Obrázku 20 (třetí měření). Získaná data v jednotlivých grafech jsou interpolována (fitována) dle metody nejmenších čtverců vhodným polynomem. Zde se opět ukázalo jako nejvhodnější použití polynomu 4. stupně. Tento polynom je pak zdrojem pro vytvoření hledané referenční tabulky, která je klíčová v měřicí fázi experimentu. V ní je tabulka využita pro stanovení hledané neznámé absolutní translace zkoumaného předmětu.

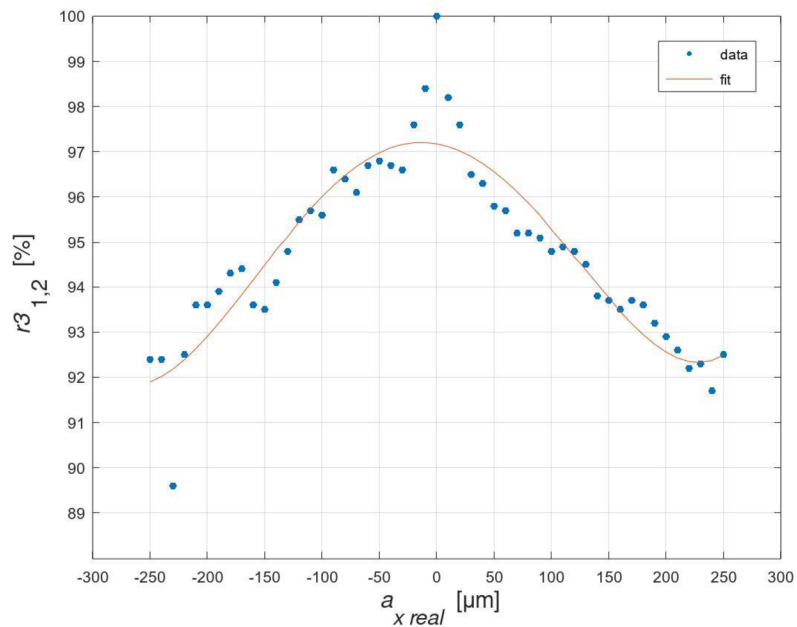
V grafech na Obrázcích 18-20 lze vidět, že korelační funkce klesá téměř symetricky na obě strany od výchozí pozice zkoumaného předmětu. Všechny tři grafy jsou si podobné, i drobné odchylky, například pokles stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ pro translaci předmětu o -240 mikrometrů (nalevo od jeho výchozí pozice), se stále opakují. Výstupní data všech těchto tří opakovaných měření, která představují dobrou reprodukovatelnost experimentu, jsou zprůměrována a opět interpolována pomocí polynomu 4. stupně (viz graf na Obrázku 21).



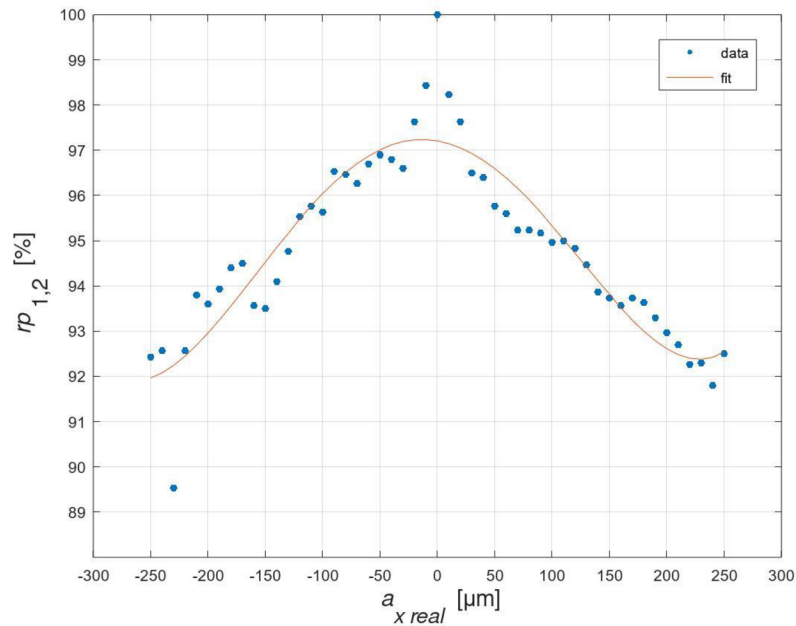
Obrázek 18: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů pro první měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.



Obrázek 19: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{2_{1,2}}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů pro druhé měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.



Obrázek 20: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $r_{3_{1,2}}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů pro třetí měření. Data jsou interpolována polynomem 4. stupně.



Obrázek 21: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů. Jedná se o průměr dat z třech opakovaných měření prezentovaných na Obrázcích 18-20. Zprůměrovaná data jsou interpolována polynomem 4. stupně.

Stejně jako v experimentu č. 1 jsou průměrná naměřená data stupně vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$ pro pozice reálné translace předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů ze tří opakovaných měření proložena polynomem 4. stupně. Přesné hodnoty všech koeficientů polynomu u jednotlivých exponentů proměnné x tohoto polynomu jsou prezentovány v Tabulce 9. Vzhledem k tomu, že při interpolaci naměřených dat pomocí polynomu se nedostaneme do nejvyšší hodnoty, lze při následném ověření funkčnosti senzoru považovat stupeň vzájemné korelace intenzit větší než 97 % za výchozí pozici translace zkoumaného předmětu.

Tabulka 9: Vypočtené koeficienty C_1 , C_2 , C_3 , C_4 a C_5 jednotlivých exponentů proměnné x polynomu 4. stupně, který interpoluje průměrná naměřená data z opakovaných měření.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$1,3349 \cdot 10^{-9}$	$8,8303 \cdot 10^{-8}$	$-1,6280 \cdot 10^{-4}$	$-4,4638 \cdot 10^{-3}$	97,207

Nalezený analytický tvar polynomu 4. stupně interpolující naše zprůměrovaná naměřená data

$$y = 1,3349 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 8,8303 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 1,628 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 4,4638 \cdot 10^{-3} \cdot x + 97,207 \quad (17)$$

je opět zdrojem pro vytvoření referenční tabulky, viz Tabulka 10, která bude využita v měřicí fázi experimentu pro stanovení hledané neznámé absolutní translace zkoumaného předmětu. Tabulka 10 představuje hlavní výsledek přípravné fáze experimentu č. 2 a bude nedílnou součástí databáze při porovnávání korelačních koeficientů získaných korelací snímků struktur koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu v měřicí fázi experimentu se snímky zaznamenanými pro známé pozice translace předmětu v kalibrační fázi experimentu. S touto tabulkou jsme schopni určit hledanou neznámou pozici zkoumaného předmětu, a tedy ověřit funkčnost patentovaného senzoru.

Tabulka 10: Referenční tabulka získaná na základě výpočtu nalezeného polynomu 4. stupně, rovnice (17), v přípravné fázi experimentu č. 2. Reálné pozice translace předmětu $a_{x \text{ real}}$ a jim odpovídající hodnoty stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ jsou v závislosti na rostoucí velikosti translace předmětu od jeho výchozí pozice.

$a_{x \text{ real}} [\mu\text{m}]$	$r_{1,2} [\%]$
-250	92,0
-200	93,1
-150	94,6
-100	96,1
-50	97,0
0	97,2
50	96,6
100	95,4
150	93,9
200	92,7
250	92,5

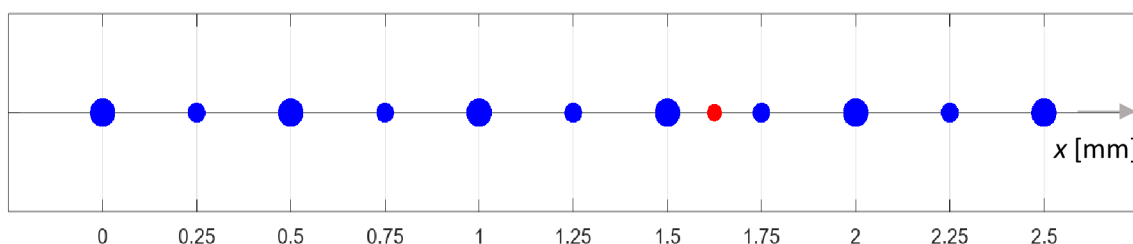
2.4.2 Kalibrační fáze

V kalibrační fázi experimentu č. 2 nejdříve vytvoříme databázi 11 zaznamenaných snímků struktur koherenčních zrnitostí podél trajektorie translačního pohybu předmětu, stejně jako jsme to učinili v předchozím experimentu. Pro experimentální sestavu č. 2 je zvolena trajektorie ve směru souřadné osy x o celkové vzdálenosti 2,5 milimetru od výchozí pozice zkoumaného předmětu. Jako klíčové pozice, modré body v Obrázku 22, jsou na této trajektorii vybrány pozice předmětu vzdálené od sebe o 250 mikrometrů, tedy v maximální vzdálenosti, na kterou jsme schopni spolehlivě určit hledanou pozici předmětu pro danou experimentální sestavu.

2.4.3 Měřicí fáze

V této fázi experimentu č. 2 obdržíme čtveřici snímků struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných v neznámých pozicích předmětu podél dané trajektorie ve směru souřadné osy x o celkové vzdálenosti 2,5 milimetru od výchozí pozice zkoumaného předmětu. Tyto snímky jsou pak porovnávány se snímky koherenčních zrnitostí uloženými v databázi během kalibrační fáze experimentu. V závislosti na vypočteném stupni vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí dle referenční tabulky (Tabulka 10) a grafu na Obrázku 21 pak lze určit neznámou pozici předmětu s přesností na 0,05 milimetrů, tedy na 50 mikrometrů.

Dále v experimentu č. 2 je obdržen ještě jeden, pátý, snímek struktury koherenční zrnitosti odpovídající pozici předmětu v poloze přesně uprostřed mezi dvěma klíčovými pozicemi, konkrétně v pozici 1,625 milimetru (viz červený puntík na Obrázku 22). Protože se zkoumaný předmět nachází přesně uprostřed mezi dvěma známými pozicemi, je očekáván neobvyklý výsledek.



Obrázek 22: Modré puntíky reprezentují pozice na trajektorii translačního pohybu zkoumaného předmětu ve směru souřadné osy x s krokem 250 mikrometrů o celkové vzdálenosti 2,5 milimetrů. Pro tyto pozice předmětu jsou do databáze zaznamenány snímky struktur koherenčních zrnitostí. Červeně je vyznačena neznámá pozice předmětu, která je detekována v měřicí fázi experimentu.

3 Výsledky měření

V této kapitole jsou prezentovány dosažené experimentální výsledky naší práce, tedy ověření funkčnosti měřicího senzoru pro detekci absolutní polohy zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru souřadné osy x , a z nich plynoucí závěry. Je rovněž ukázáno, jak důležité bylo kvalitní provedení přípravné fáze experimentu, to znamená stanovení příslušné referenční tabulky pomocí interpolace naměřených dat pro experimentální uspořádání č. 1 a č. 2 měřicího senzoru (Tabulka 7 a Tabulka 10).

3.1 Výsledky experimentu č. 1

Jak již bylo popsáno v měřicí fázi experimentu č. 1, obdrželi jsme čtveřici snímků struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných pro neznámé pozice předmětu. Tyto pozice byly známy pouze vedoucímu bakalářské práce a nikoli jejímu autorovi. Snímky koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu jsou označeny takto: *snimek_poziceV.Vmm.tif*, *snimek_poziceX.Xmm.tif*, *snimek_poziceY.Ymm.tif* a *snimek_poziceZ.Zmm.tif*.

Výsledky porovnání (korelace) jednotlivých snímků koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu se všemi zaznamenanými snímky koherenčních zrnitostí pro klíčové pozice předmětu uloženými v databázi během kalibrační fáze experimentu č. 1 jsou demonstrovány v Tabulce 11. V prvním sloupci tabulky jsou uvedeny klíčové pozice předmětu (0 milimetrů až 5 milimetrů s krokem 0,5 milimetrů) na dané pohybové trajektorii, ve druhém, třetím, čtvrtém a pátém sloupci jsou pak sumarizovány vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$, $r_{1,2}(X.X)$, $r_{1,2}(Y.Y)$ a $r_{1,2}(Z.Z)$ snímků struktur koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu $V.V$ mm, $X.X$ mm, $Z.Z$ mm a $Y.Y$ mm s klíčovými pozicemi předmětu. Pro lepší orientaci jsou v Tabulce 11 vyznačeny červeně hodnoty stupně vzájemné korelace intenzit, které vykazují nejvyšší podobnost mezi snímky struktur koherenčních zrnitostí, a které tak představují dvě nejbližší klíčové pozice předmětu vzhledem k jeho neznámé pozici.

Ke zpřesnění stanovení neznámé pozice předmětu mezi dvěma klíčovými pozicemi použijeme referenční Tabulku 7 danou pomocí interpolační funkce (16). Zde je důležité, aby se nalezená výsledná pozice předmětu vždy shodovala, ať ji vztahujeme k nejbližší levé nebo pravé klíčové pozici předmětu. Tímto se naplnilo očekávání, že nalezení co nejvhodnější interpolační funkce v přípravné fázi měření bude velmi významné pro přesnost výsledku stanovení výsledné (hledané) pozice předmětu.

Tabulka 11: Vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$, $r_{1,2}(X.X)$, $r_{1,2}(Y.Y)$ a $r_{1,2}(Z.Z)$ snímků struktur koherenčních zrnitostí pro čtyři neznámé pozice předmětu $V.V$ mm, $X.X$ mm, $Z.Z$ mm a $Y.Y$ mm a známé pozice předmětu, jejichž snímky jsou zaznamenány v databázi měřicího senzoru. Klíčové pozice předmětu reprezentují pozice: 0 milimetrů až 5 milimetrů s krokem 0,5 milimetrů. Červeně označené hodnoty vykazují nejvyšší podobnost neznámé pozice předmětu s klíčovými pozicemi.

Klíčové pozice [mm]	$r_{1,2}(V.V)$ [%]	$r_{1,2}(X.X)$ [%]	$r_{1,2}(Y.Y)$ [%]	$r_{1,2}(Z.Z)$ [%]
0	22,4	98,3	27,1	24,7
0,5	22,4	88,6	33,7	28,1
1	23,5	60,7	36,8	35,1
1,5	24,4	32,6	30,3	38,1
2	33,2	23,2	27,1	66,5
2,5	23,3	19,9	75,1	90,9
3	22,8	26,1	92,8	97,0
3,5	21,6	27,0	96,9	87,9
4	84,2	21,6	86,7	23,9
4,5	96,4	24,5	31,5	24,9
5	94,1	35,0	24,7	33,7

Konečné výsledky měření jsou pak prezentovány v Tabulce 12. Konkrétně ve druhém řádku tabulky jsou uvedeny neznámé pozice zkoumaného předmětu (tj. velikosti absolutní translace předmětu vzhledem k počátku jeho trajektorie) naměřené pomocí námi použitého měřicího senzoru založeného na výpočtu stupně vzájemné korelace intenzit. Ve třetím řádku tabulky jsou dále uvedeny skutečné hodnoty pozic předmětu tak, jak byly definovány a zaznamenány vedoucím bakalářské práce.

Z Tabulky 12 je zřejmé, že se pomocí měřicího senzoru podařilo úspěšně stanovit všechny čtyři neznámé pozice zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru souřadné osy x , čímž byla ověřena funkčnost měřicího senzoru pro experimentální uspořádání č. 1.

Tabulka 12: Naměřené (druhý řádek) a skutečné hodnoty (třetí řádek) neznámých pozic zkoumaného předmětu, tj. velikosti absolutní translace předmětu, $a_x(V.V)$, $a_x(X.X)$, $a_x(Y.Y)$, $a_x(Z.Z)$. Naměřené hodnoty jsou získány užitím patentovaného měřicího senzoru, který je založen na principu výpočtu stupně vzájemné korelace intenzit.

$a_x(V.V)$ [mm]	$a_x(X.X)$ [mm]	$a_x(Y.Y)$ [mm]	$a_x(Z.Z)$ [mm]
4,7	0	3,4	2,9
4,7	0	3,4	2,9

Jak úspěšné bylo měření s využitím patentovaného měřicího senzoru pro experimentální sestavu č. 1 lze ještě nezávisle ověřit pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti. Protože známe geometrické parametry experimentální sestavy, lze neznámé pozice translace předmětu stanovit vůči známým (klíčovým) pozicím předmětu ze vzorce (11). Stačí nám totiž vypočítat normovanou korelační funkci intenzit mezi snímky koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu a všemi zaznamenanými snímky struktur koherenčních zrnitostí v databázi pro známé pozice předmětu. Pozice maxima této korelační funkce pak představuje vzájemný posuv A_x porovnávaných struktur koherenčních zrnitostí a odtud už pomocí vzorce (11) jednoduše vypočítáme jim odpovídající translaci předmětu a_x . Toto nám ukazuje Tabulka 13. Postup je relevantní jen pro kontrolu právě tohoto výsledku. Při změně geometrických parametrů experimentální sestavy by tato kontrola nebyla možná.

Tabulka 13: Translace předmětu $a_x(V.V)$, $a_x(X.X)$, $a_x(Y.Y)$, $a_x(Z.Z)$ stanovené od neznámé pozice předmětu ke známým (klíčovým) pozicím předmětu pomocí metody korelace polí koherenční zrnitosti. Červeně označené hodnoty jsou dvě nejbližší translace předmětu od hledané pozice.

Klíčové pozice [mm]	$a_x(V.V)$ [mm]	$a_x(X.X)$ [mm]	$a_x(Y.Y)$ [mm]	$a_x(Z.Z)$ [mm]
0	390	2	632	-174
0,5	456	-504	124	-678
1	824	-1000	-380	968
1,5	610	-932	880	468
2	-776	-342	394	900
2,5	454	-244	902	402
3	-48	-938	400	-100
3,5	858	-738	-104	-604
4	706	998	-608	-990
4,5	202	-194	-934	-924
5	-310	784	912	606

Na tomto místě můžeme připomenout, že při translačních pohybech větších než 1 milimetr dochází k výraznému zkreslení výsledku normované korelační funkce. Zároveň při translacích větších než 500 mikrometrů porušujeme podmínku velikosti datového soboru nutného pro exaktní výpočet korelace snímků struktur koherenčních zrnitostí. Například co se týče neznámé translace předmětu $a_x(X.X)$, jejíž snímek struktury koherenční zrnitosti byl zaznamenán v pozici 0 milimetrů, je v Tabulce 13 vidět, že vypočtené translace předmětu vůči klíčovým pozicím vzdálenějším více než 1 milimetr dávají nesmyslné hodnoty. Dále můžeme z tabulky vyčíst, že hledaná neznámá pozice předmětu odpovídá porovnávané klíčové pozici hodnotou kladné (napravo od klíčové pozice) i záporné (nalevo od klíčové pozice) translace.

3.2 Výsledky experimentu č. 2

V měřicí fázi experimentu č. 2 jsme obdrželi pětici snímků struktur koherenčních zrnitostí zaznamenaných pro neznámé pozice předmětu. Bylo to tedy o jednu neznámou pozici více než v experimentu č. 1. Tyto neznámé pozice byly opět známy pouze vedoucímu bakalářské práce a nikoli jejímu autorovi. Snímky koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu jsou označeny takto: *snimek_poziceP.Pmm.tif*, *snimek_poziceV.Vmm.tif*, *snimek_poziceX.Xmm.tif*, *snimek_poziceZ.Zmm.tif* a *snimek_poziceO.Omm.tif*.

Výsledky korelace jednotlivých snímků koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu se všemi zaznamenanými snímky koherenčních zrnitostí pro klíčové pozice předmětu, které byly uloženy v databázi během kalibrační fáze experimentu č. 2, jsou demonstrovány v Tabulce 14. V prvním sloupci tabulky jsou uvedeny klíčové pozice předmětu (0 milimetrů až 2,5 milimetrů s krokem 0,25 milimetrů) na dané pohybové trajektorii, ve druhém, třetím, čtvrtém, pátém a šestém sloupci jsou pak sumarizovány vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(P.P)$, $r_{1,2}(V.V)$, $r_{1,2}(X.X)$, $r_{1,2}(Z.Z)$ a $r_{1,2}(O.O)$ snímků struktur koherenčních zrnitostí pro neznámé pozice předmětu $P.P$ mm, $V.V$ mm, $X.X$ mm, $Z.Z$ mm a $O.O$ mm a pro klíčové pozice předmětu. Pro lepší orientaci jsou v Tabulce 14 opět vyznačeny červeně hodnoty stupně vzájemné korelace intenzit, které vykazují nejvyšší podobnost mezi snímky struktur koherenčních

Tabulka 14: Vypočtené stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(P.P)$, $r_{1,2}(V.V)$, $r_{1,2}(X.X)$, $r_{1,2}(Z.Z)$ a $r_{1,2}(O.O)$ snímků struktur koherenčních zrnitostí pro pět neznámých pozic předmětu $P.P$ mm, $V.V$ mm, $X.X$ mm, $Z.Z$ mm a $O.O$ mm a známé pozice předmětu, jejichž snímky jsou zaznamenány v databázi měřicího senzoru. Klíčové pozice předmětu reprezentují pozice: 0 milimetrů až 2,5 milimetrů s krokem 0,25 milimetrů. Červeně označené hodnoty vykazují nejvyšší podobnost neznámé pozice předmětu s klíčovými pozicemi.

Klíčové pozice [mm]	$r_{1,2}(P.P)$ [%]	$r_{1,2}(V.V)$ [%]	$r_{1,2}(X.X)$ [%]	$r_{1,2}(Z.Z)$ [%]	$r_{1,2}(O.O)$ [%]
0	98,0	90,1	27,9	41,0	26,4
0,25	92,2	95,7	29,4	31,3	33,5
0,5	60,2	93,8	87,0	28,4	26,6
0,75	28,3	79,9	94,6	26,6	26,0
1	29,7	31,1	94,8	81,8	27,6
1,25	33,7	32,5	87,1	93,3	90,6
1,5	41,0	30,2	26,7	98,7	95,7
1,75	31,2	26,5	22,8	90,0	93,4
2	36,3	25,6	28,5	73,7	80,2
2,25	40,1	19,2	27,7	26,5	38,6
2,5	53,5	40,5	28,9	28,8	28,1

zrnitostí, a které tak představují dvě nejbližší klíčové pozice předmětu vzhledem k jeho neznámé pozici.

Ke zpřesnění stanovení neznámé pozice předmětu mezi dvěma klíčovými pozicemi použijeme nyní referenční Tabulku 10, která byla specifikována pomocí interpolační funkce (17). Znovu je důležité připomenout nutnost, aby nalezená výsledná pozice předmětu byla vždy shodná ať už vzhledem k nejbližší levé či nejbližší pravé klíčové pozici předmětu.

Konečné výsledky měřicí fáze experimentu č 2 jsou prezentovány v Tabulce 15, přičemž ve druhém řádku tabulky jsou uvedeny neznámé pozice zkoumaného předmětu (tj. velikosti absolutní translace předmětu vzhledem k počátku jeho trajektorie) naměřené pomocí použitého měřicího senzoru založeného na výpočtu stupně vzájemné korelace intenzit. Ve třetím řádku tabulky jsou pak uvedeny skutečné hodnoty neznámých pozic předmětu tak, jak byly definovány a zaznamenány vedoucím bakalářské práce.

Tabulka 15: Naměřené (druhý řádek) a skutečné hodnoty (třetí řádek) neznámých pozic zkoumaného předmětu, tj. velikosti absolutní translace předmětu, $a_x(P.P)$, $a_x(V.V)$, $a_x(X.X)$, $a_x(Z.Z)$, $a_x(O.O)$. Naměřené hodnoty jsou získány užitím patentovaného měřicího senzoru, který je založen na principu výpočtu stupně vzájemné korelace intenzit.

$a_x(P.P)$ [mm]	$a_x(V.V)$ [mm]	$a_x(X.X)$ [mm]	$a_x(Z.Z)$ [mm]	$a_x(O.O)$ [mm]
0	0,30	0,85	1,50	1,60
0	0,30	0,85	1,50	1,625

Z Tabulky 15 vyplývá, že se pomocí měřicího senzoru podařilo úspěšně stanovit čtyři neznámé pozice zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru souřadné osy x , čímž byla ověřena funkčnost měřicího senzoru pro experimentální uspořádání č. 2. Ze znalosti interpolační funkce (17) a příslušné referenční tabulky (Tabulka 10) je mimo jiné zřejmé, že jakýkoliv stupeň vzájemné korelace intenzit struktur koherenčních zrnitostí větší než 97,2 % odpovídá známé (klíčové) pozici předmětu. To znamená, že podle výsledků uvedených v Tabulce 14 lze okamžitě neznámé pozice předmětu $P.P$ mm a $Z.Z$ mm ztotožnit s klíčovými pozicemi 0 milimetrů a 1,5 milimetrů. Tedy nalezené absolutní translace předmětu na trajektorii pohybu ve směru souřadné osy x můžeme vyjádřit jako $a_x(P.P) = 0$ mm a $a_x(Z.Z) = 1,5$ mm (viz Tabulka 15)

Co se týče páté neznámé pozice předmětu označené jako $O.O$ mm, která byla nastavena jako prostřední pozice (1,625 milimetrů) mezi dvěma klíčovými pozicemi předmětu 1,50 milimetrů a 1,75 milimetrů na jeho pohybové trajektorii, nebylo možné tuto pozici předmětu přesně detekovat vlivem omezené přesnosti našeho měřicího

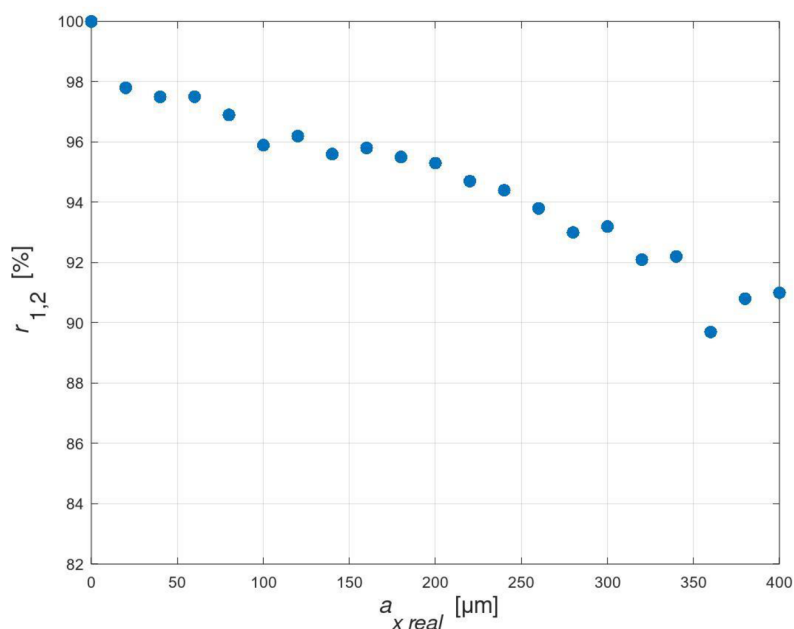
senzoru. Pro experimentální uspořádání č. 2 tato přesnost odpovídá optimálnímu měřicímu kroku 50 mikrometrů, ve kterém jsme schopni spolehlivě rozlišit dvě různé pozice translace předmětu. Hodnotu neznámé pozice předmětu označené jako $O.O$ mm jsme proto určili jako nejbližší rozlišitelnou pozici, a to 1,60 milimetrů. To znamená, že zapíšeme absolutní translaci jako $a_x(O.O) = 1,60$ mm.

4 Diskuse

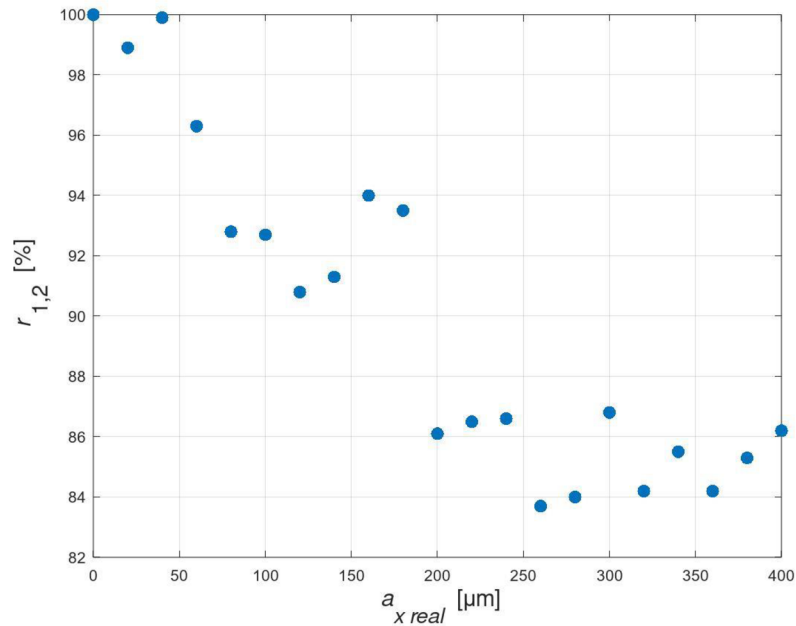
V této kapitole jsou analyzovány nebo objasněny postupy a výsledky měření, kterých jsme dosáhli při ověřování funkčnosti senzoru pro stanovení absolutní polohy zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru souřadné osy x .

V kapitole 1.8 jsme zmiňovali, že pro výpočet normované funkce vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí použijeme vzorec (15), který pracuje s odchylkami intenzit, a to z důvodu, že pokles korelační funkce je ve zvoleném rozsahu pohybujícího se předmětu pozvolný (lineárně aproximovatelný), a tedy vhodnější pro náš experiment. Pro důkaz tohoto tvrzení jsou zde uvedeny dva grafy, přičemž ten na Obrázku 23 reprezentuje pokles stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí v závislosti na rostoucí reálné translaci předmětu a_{x-real} od jeho výchozí pozice za použití vzorce (15), zatímco graf na Obrázku 24 reprezentuje stejnou závislost, ale vypočtenou za použití vzorce (13).

Na Obrázku 23 můžeme skutečně pozorovat, že pokles stupně vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí je mírný a lze jej dobře aproximovat jako lineární. Naopak při použití vzorce (13), jak tomu je na Obrázku 24, lze jasně vidět, že



Obrázek 23: Graf závislosti poklesu stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí, dle vzorce (15), v závislosti na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů.



Obrázek 24: Graf závislosti poklesu stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí, dle vzorce (13), v závislosti na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 20 mikrometrů.

pokles stupně vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí je výrazný a skokový (hůře aproximovatelný). Z tohoto důvodu jsme usoudili, že vzorec (13) je v našem experimentu pro danou aplikaci nevhodný.

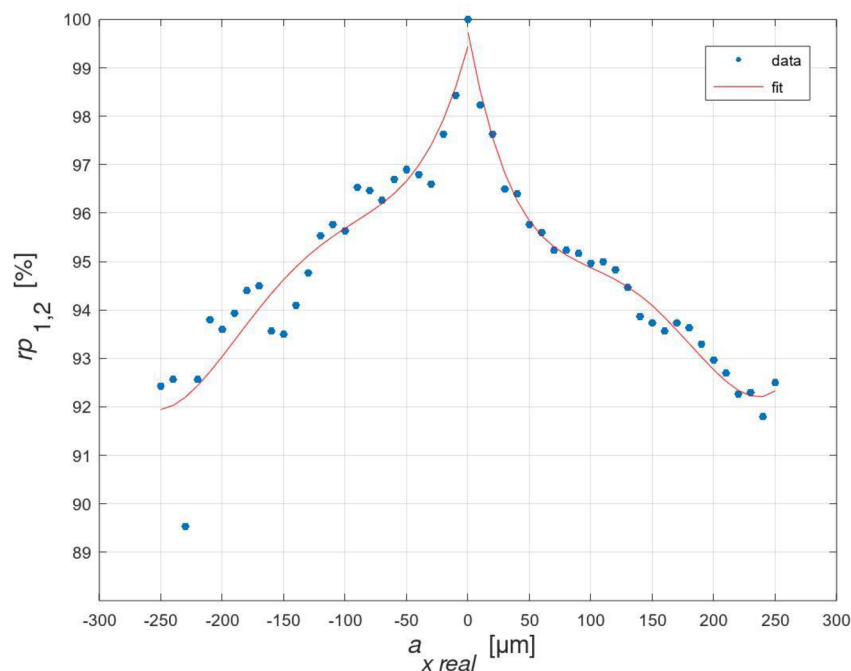
Podívejme se dále na přesnost dosažených výsledků při ověřování funkčnosti senzoru. V případě experimentu č. 1 jsme byli schopni určit všechny neznámé pozice předmětu velmi přesně, a to dle referenční Tabulky 7 stanovené na základě interpolační funkce (16) z naměřených dat na Obrázku 16. Při hledání neznámých pozic předmětu se nevyskytly případy, ve kterých by korelace snímků koherenčních zrnitostí pro hledanou pozici předmětu a známé pozice předmětu zleva i zprava udávaly jinou polohu. Velkou roli v této přesnosti hraje především pravidelný a téměř symetrický průběh poklesu stupně vzájemné korelace intenzit, který lze vidět na Obrázku 16. Interpolační funkce (polynom 4. stupně) přesně vystihuje naměřená data a její pokles je dostatečný, aby bylo možné spolehlivě rozlišit pozice předmětu odpovídající reálné translaci s optimálním měřicím krokem 100 mikrometrů.

U experimentu č. 2 už byla situace složitější, přesto jsme i zde byli úspěšní. Některé neznámé pozice předmětu jsme ale určovali s větší nejistotou měření pohybující se na hraně optimálního měřicího kroku 50 mikrometrů. Jasným příkladem bylo stanovení neznámé pozice předmětu $V.V$ mm. Stupeň vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$ vzhledem ke klíčové pozici 0,25 milimetru odpovídal dle referenční Tabulky 10 stanovené na základě interpolační funkce (17) translaci vůči této pozici o 50–100 mikrometrů napravo. Při porovnávání s klíčovou pozicí 0,50 milimetru nám pak stupeň vzájemné

korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$ udával, že se hledaná pozice předmětu nachází, opět dle referenční Tabulky 10, ve vzdálenosti 150–200 mikrometrů nalevo od této klíčové pozice. Je zřejmé, že tyto údaje způsobují nejistotu měření při stanovení hledané pozice ve výši ± 50 mikrometrů. Tyto nepřesnosti (odchyly) jsou způsobeny nedokonalou interpolací dat (viz Obrázek 21), která nevystihuje kladnou část naměřených dat dostatečně přesně. Dáme-li tedy oba údaje dohromady, nalezenou hodnotu absolutní translace předmětu na trajektorii pohybu ve směru souřadné osy x můžeme vyjádřit jako $a_x(V.V) = (0,30 \pm 0,05)$ mm.

Při hledání řešení, jak tuto nepřesnost snížit, se objevil nápad rozdělit naměřená data prezentovaná na Obrázku 21 na kladnou a zápornou část a interpolovat každou část vhodným polynomem samostatně (viz Obrázek 25). Nakonec byl opět jako nejvýhodnější zvolen pro obě části naměřených dat polynom 4. stupně. Přesné hodnoty všech koeficientů u jednotlivých exponentů proměnné x těchto dvou polynomů jsou prezentovány v Tabulce 16.

Nalezené analytické tvary polynomů 4. stupně interpolující naše zprůměrovaná naměřená data y^- (záporná část) a y^+ (kladná část)



Obrázek 25: Graf závislosti stupně vzájemné korelace intenzit $rp_{1,2}$ snímků struktur koherenčních zrnitostí na reálné translaci předmětu a_{x-real} s krokem 10 mikrometrů v celkovém rozsahu translace ± 250 mikrometrů. Jedná se o průměr dat z třech opakovaných měření prezentovaných na Obrázcích 18-20. Zprůměrovaná data jsou rozdělena na zápornou a kladnou část a obě části jsou interpolovány polynomem 4. stupně.

Tabulka 16: Vypočtené koeficienty C_1 , C_2 , C_3 , C_4 a C_5 jednotlivých exponentů proměnné x polynomů 4. stupně, které interpolují průměrná naměřená data z opakovaných měření pro zápornou část dat (druhý řádek tabulky) a kladnou část dat (třetí řádek tabulky)

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$9,6974 \cdot 10^{-9}$	$5,4320 \cdot 10^{-6}$	$1,0060 \cdot 10^{-3}$	$9,3500 \cdot 10^{-2}$	99,443
$1,3513 \cdot 10^{-8}$	$-7,7155 \cdot 10^{-6}$	$1,5076 \cdot 10^{-3}$	$-1,3557 \cdot 10^{-1}$	99,729

$$y_- = 9,6974 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 5,4320 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,0060 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 9,3500 \cdot 10^{-3} \cdot x + 99,443 \quad (18)$$

$$y_+ = 1,3513 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 7,7155 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,5076 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 1,3557 \cdot 10^{-1} \cdot x + 99,729 \quad (19)$$

jsou opět zdrojem pro vytvoření referenční tabulky (viz Tabulka 17), která by měla být využita pro zpřesnění stanovení neznámých pozic absolutní translace zkoumaného předmětu v experimentu č. 2.

Jak lze pozorovat v grafu na Obrázku 25, interpolace kladné a záporné části vystihují naměřená data opravdu přesněji než interpolace v prvním případě (viz Obrázek 21). Nové interpolace navíc popisují věrohodně i chování korelační funkce okolo nulté, a tedy výchozí pozice předmětu, což v předchozím případě nebylo možné. Z tohoto důvodu je referenční Tabulka 17 vytvořena s krokem 25 mikrometrů, ačkoli optimální krok umožňující spolehlivě rozlišit dvě klíčové pozice na trajektorii při translačním pohybu předmětu je stanoven na hodnotu 50 mikrometrů.

Vraťme se nyní k prezentovanému příkladu stanovení neznámé pozice předmětu $V.V$ mm, ale za použití nové referenční tabulky. Stupeň vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$ vzhledem ke klíčové pozici 0,25 milimetrů odpovídá dle referenční Tabulky 17 stanovené na základě interpolačních funkcí (18) a (19) translaci vůči této pozici o 50 mikrometrů napravo. Při porovnávání s klíčovou pozicí 0,50 milimetrů nám pak stupeň vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}(V.V)$ udává, že se hledaná pozice předmětu nachází dle referenční Tabulky 17 ve vzdálenosti 175 mikrometrů nalevo od této klíčové pozice. Je zřejmé, že tyto údaje způsobují nejistotu měření ve stanovení hledané pozice ve výši ± 25 mikrometrů. Po započtení obou údajů (z levé i pravé strany od klíčových pozic předmětu), lze nalezenou hodnotu absolutní translace předmětu na trajektorii pohybu ve směru souřadné osy x vyjádřit jako $a_x(V.V) = (0,300 \pm 0,025)$ mm.

Tabulka 17: Referenční tabulka získaná na základě výpočtu nalezených polynomů 4. stupně, rovnice (18) a (19) pro experiment č. 2. Reálné pozice translace předmětu $a_{x,real}$ a jim odpovídající hodnoty stupně vzájemné korelace intenzit $r_{1,2}$ jsou v závislosti na rostoucí velikosti translace předmětu od jeho výchozí pozice.

a_x [μm]	$r_{1,2}$ [%]
-250	91,9
-225	92,3
-200	93,0
-175	93,9
-150	94,6
-125	95,2
-100	95,7
-75	96,1
-50	96,7
-25	97,7
0	99,5
25	97,2
50	95,8
75	95,2
100	94,9
125	94,6
150	94,1
175	93,5
200	92,8
225	92,3
250	92,3

V případě první interpolace v experimentu č. 2 jsme byli schopni určit hledanou pozici tělesa s nejistotou měření ± 50 mikrometrů. Pokud ovšem využijeme interpolaci dat rozdělených na kladnou a zápornou část, nejistota měření se nám sníží na ± 25 mikrometrů, takže provedení nové interpolace naměřených dat má jednoznačný přínos.

Co se týče pozice předmětu označené $O.O$ mm, která byla nastavena jako prostřední pozice (1,625 milimetrů) mezi dvěma klíčovými pozicemi předmětu 1,50 milimetrů a 1,75 milimetrů, stále nejsme schopni ji přesně určit. Z Tabulky 14 a referenční Tabulky 17 vyplývá, že předmět se bude nacházet okolo pozice 1,575 milimetrů

vzhledem k počátku trajektorie pohybu, což je ve vzdálenosti 50 mikrometrů od skutečné hodnoty neznámé pozice předmětu. Z tohoto tedy můžeme vyvodit, že ačkoliv je druhá interpolace dat přesnější než první, stále nejsme schopni rozlišovat vzdálenosti menší než 50 mikrometrů.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ověření funkčnosti patentovaného měřicího senzoru pro bezkontaktní detekci absolutní polohy pohybujícího se předmětu s využitím jevu koherenční zrnitosti. To znamená především navržení konkrétních experimentálních sestav senzoru umožňujících dosažení různých měřicích rozsahů a minimálních měřicích kroků při detekci zkoumaného předmětu vykonávajícího translační pohyb ve směru souřadné osy x . Dále provedení jednotlivých fází experimentu – přípravné, kalibrační a měřicí a v této souvislosti rovněž vytvoření skriptů v matematickém software Octave pro zpracování naměřených dat a jejich geometrickou interpretaci.

Podarilo se nám navrhnout dvě různé experimentální sestavy měřicího senzoru, které se vzájemně lišily volbou svých geometrických a optických parametrů. Experimentální sestava č. 1 odpovídala případu, kdy translace zkoumaného předmětu o jeden mikrometr vyvolala v pozici CMOS kamery, která snímá strukturu koherenční zrnitosti, posuv této struktury o dva pixely. Experimentální sestava č. 2 pak byla navržena tak, aby translace předmětu o jeden mikrometr vyvolala posuv struktury koherenční zrnitosti o jeden pixel. Volba konkrétních geometrických parametrů sestav (úhly směrů osvětlení a pozorování, vzdálenosti předmětu od světelného zdroje a kamery) byla založena na znalosti metody korelace polí koherenční zrnitosti. Volba optických parametrů sestav (ohnisková vzdálenost osvětlovací čočky) pak byla motivována zachováním velikostí skvrn ve struktuře koherenční zrnitosti, které mají významnou roli při přesnosti výpočtu vzájemné korelace snímků struktur koherenčních zrnitostí.

Skripty pro zpracování a vyhodnocení naměřených dat byly napsány v matematickém software Octave. Nejprve byl vytvořen skript pro výpočet normované funkce vzájemné korelace intenzit ve zvolených řádcích snímků struktur koherenčních zrnitostí. Díky tomuto skriptu jsme byli schopni po uložení zaznamenaných snímků struktur koherenčních zrnitostí určit jejich vzájemnou podobnost a vzájemný posuv. Poté jsme ze získaných hodnot stupňů vzájemné korelace intenzit vytvořili graf a zobrazená data interpolovali metodou nejmenších čtverců pro jasnější interpretaci výsledků a následné výpočty. Také pro proces interpolace dat byl vytvořen příslušný skript.

Celkem byly provedeny dva nezávislé samostatné experimenty (experiment č. 1 a experiment č. 2) pro výše popsané různé experimentální sestavy. V obou jsme provedli tři fáze – přípravnou, kalibrační a měřicí. V případě experimentu č. 1 jsme v přípravné fázi experimentu obdrželi průměrný graf poklesu stupně vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí v závislosti na reálné translaci předmětu $a_{x\ real}$ s krokem 20 mikrometrů pro celkový rozsah translace předmětu ± 500 mikrometrů. Pomocí provedené interpolace dat příslušným polynomem 4. stupně jsme pak mohli vytvořit referenční tabulku umožňující rozlišit neznámé pozice zkoumaného předmětu s optimálním krokem 100 mikrometrů. V přípravné fázi experimentu č. 2 jsme

postupovali analogicky a obdrželi průměrný graf poklesu stupně vzájemné korelace intenzit snímků struktur koherenčních zrnitostí v závislosti na rostoucí reálné translaci předmětu $a_{x \text{ real}}$ s krokem 10 mikrometrů pro celkový rozsah translace předmětu ± 250 mikrometrů. Pomocí provedené interpolace dat příslušným polynomem 4. stupně jsme opět vytvořili referenční tabulku umožňující rozlišit neznámé pozice zkoumaného předmětu s optimálním krokem 50 mikrometrů. Průměrný graf byl v obou experimentech vytvořen na základě tří opakovaných měření, která vykazovala vysokou reprodukovatelnost tohoto experimentu. V kalibrační fázi obou experimentů jsme pak vytvořili databázi jedenácti snímků koherenčních zrnitostí, které odpovídaly známým (klíčovým) pozicím předmětu na jeho trajektorii pohybu. V případě experimentu č. 1 byla celková translace předmětu na jeho trajektorii 5 milimetrů s maximálním měřicím krokem 500 mikrometrů a v případě experimentu č. 2 byla celková translace předmětu 2,5 milimetrů s maximálním měřicím krokem 250 mikrometrů. Konečně v měřicí fázi obou experimentů jsme obdrželi snímky koherenčních zrnitostí pro čtyři, resp. pět neznámých pozic předmětu a vzájemnou korelaci těchto snímků se snímky uloženými v databázi měřicího senzoru jsme pak nejvyšší dosažené výsledky stupňů vzájemné korelace intenzit porovnávali s hodnotami v příslušné referenční tabulce. Tímto jsme stanovili výslednou hledanou pozici předmětu nacházející se mezi klíčovými pozicemi předmětu nebo v jedné z klíčových pozic. V případě první experimentální sestavy jsme byli schopni určit neznámou pozici předmětu s přesností na 100 mikrometrů, když neurčitost měření dosahovala 50 mikrometrů. U druhé experimentální sestavy jsme určili neznámou pozici předmětu s přesností na 50 mikrometrů, přičemž neurčitost měření byla 25 mikrometrů.

Hlavní cíl práce, tedy ověření funkčnosti měřicího senzoru, byl provedením dvou nezávislých experimentů splněn, a je tedy možné konstatovat, že patentovaný měřicí senzor lze opravdu využít v reálných aplikacích pro případ detekce absolutní polohy předmětu vykonávajícího translační pohyb. Ideální měřicí rozsah senzoru odpovídá desítkám a stovkám mikrometrů až jednotkám milimetrů. Po vytvoření dostatečně velké databáze snímků struktur koherenčních zrnitostí lze tento měřicí senzor použít i v případě, že neznáme geometrické parametry sestavy. Zajímá nás jenom stupeň vzájemné korelace intenzit mezi snímky koherenčních zrnitostí zaznamenaných v databázi a těch pro hledané pozice předmětu. I v tomto případě je ale důležité vyjádřit si graficky pokles stupně vzájemné korelace intenzit v závislosti na rostoucí translaci předmětu od jeho výchozí pozice na zvolené trajektorii.

Dalším postupem navazujícím na bakalářskou práci by mohlo být ověření funkčnosti měřicího senzoru pro případ rotačního pohybu zkoumaného předmětu při detekci jeho absolutní polohy.

Seznam literatury

- [1] Horváth, P., Šmíd, P., Hrabovský, M., Stanke, L.: A method of a non-contact detection of a moving object absolute position by making use of speckle effect and device for implementation of this method. Evropský patent č. **EP2775268B1**, 2019.
- [2] Malý, P.: Optika. Nakladatelství Karolinum, Vydání 2., Praha, 2013. ISBN: 978-8024622460.
- [3] Saleh, B. E. A., Teich, M. C.: Fundamental of Photonics. John Wiley & Sons, New York, 1991. ISBN: 978-0471839655.
- [4] Hecht, E.: Optics. 5th Edition, Adelphi University, 2017. ISBN: 978-0133977226.
- [5] Vandergriff, L. J., Kolluri, R., Seeber, F., Pedrotti, L.: Fundamentals of Light and Lasers. 3rd Edition, University of Central Florida, 2018. ISBN: 978-0999853641.
- [6] Fox, A. M.: Atomic and Laser Physics. University of Sheffield, 2018. ISBN: 978-1108446310.
- [7] Horváth, P., Šmíd, P.: Koherenční zrnitost a její vybrané aplikace. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2012. ISBN: 978-8024431123.
- [8] Dainty, J. S.: Laser Speckle and Related Phenomena. Springer, Berlin, 1975. ISBN: 978-3662432051.
- [9] Hrabovský, M., Bača, Z., Horváth, P.: Koherenční zrnitost v optice. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2001. ISBN: 8024402866.
- [10] Pechník, J.: Sledování biologické aktivity listů rajčete pomocí jevu koherenční zrnitost. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2019.
- [11] Šipula, M.: Zařízení pro lineární odměřování polohy. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2010.
- [12] Stanke, L.: Vliv typu numerické korelace struktur koherenčních zrnitosti na měřené translace zkoumaného předmětu metodou korelace polí koherenčních zrnitostí. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2010.

Přílohy

Příloha 1 – Technický list kamery CMOS

SILICON VIDEO® 2112C

Dimensions

PIXCI D2X

Manual

Pricing

Software

XCAP

XCLIB

PXIPL

Optional

TTL Module

PDFs

Sensor

Datasheet

Spectral

Response

SILICON VIDEO® 2112C CMOS Cameras with PIXCI® D2X PCI Interface

SILICON VIDEO® 2112C color camera, from EPIX, Inc., features an active programmable array resolution of 1288 x 1032 pixels, with sub-windowing, sub-sampling, mirror and flip modes, 10 bit dynamic range, and frame rates exceeding 290 Hz (at reduced resolution). XCAP™ software provides control of all sensor features.

SENSOR BY ZORAN

The SILICON VIDEO 2112C camera is based on the ZR32112PLC (Color) CMOS sensor from Zoran Corporation. This CMOS sensor allows decimation (sub-sampling) and can be driven over a wide range of pixel clock frequencies. It can be operated in either still mode (simultaneous integration of all pixel elements) or video mode (rolling shutter integration with continuous readout). These advanced sensor characteristics are critical to the innovative design and exceptional performance of the SILICON VIDEO camera.

PIXEL CLOCK AND FRAME RATE

The SILICON VIDEO 2112C camera is driven by a variable frequency pixel clock that can be set over a range of 1 MHz to 46 MHz. For any resolution and decimation setting, an increase in the pixel clock frequency will provide a higher frame rate. For example, capture a 1288 x 1032 image @ 0.5 fps using a 1MHz pixel clock - or capture a 1288 x 1032 image at 26 fps using a 46 MHz pixel clock. With a resolution of 320x258, capture 6.5 fps @ 1MHz, or 291 fps @ 46 MHz.

ONLY ONE CABLE

One cable connects the SILICON VIDEO® 2112C camera to the PIXCI® D2X. The PIXCI® D2X provides power to the camera, sends and receives camera control signals, and receives video data. There is no need for a separate camera power supply and cable.


CAMERA ADJUST MENU

The XCAP™ Imaging Application provides a camera control menu to select pixel clock frequency, integration/exposure time, decimation (sub-sampling) and trigger control. The color camera menu provides automatic white balance as well as manual adjustment of Red, Green, and Blue gain.

SYSTEM PRICE ONLY \$1095.00

The SILICON VIDEO 2112C camera is only \$1095.00 for the camera head, 2-meter interface cable, PIXCI D2X imaging board, and XCAP-LITE imaging program. The SILICON VIDEO 2112C camera requires a C-Mount lens with 1" format.

To complete the system add lens, lighting, computer, and analysis software; which are also available from EPIX, Inc., or from your authorized EPIX, Inc. representative or distributor.

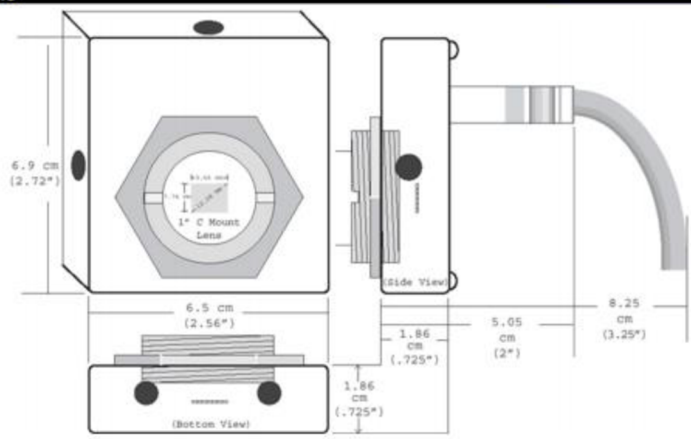


*Lens optional.

- SV2112 CMOS Color Camera
- PIXCI® D2X Digital Frame Grabber
- Camera Frame Rate Sequence Capture
- Triggered Image Sequence Capture
- 132 MB/s Burst Transfers
- Camera Integration and Reset Control
- 2 Meter Interface Cable
- XCAP-Lite Imaging Application
- PCI Bus: 32 or 64 bit, 3.3 or 5 volt
- Windows & Linux, 32 & 64-bit
- \$1095.00

Resolution	Scan Mode	Frame Rate @ 16MHz
1288 x 1032	Contiguous	9.3 fps
1024 x 768	sub-windowed	12.4 fps
800 x 600	sub-windowed	15.9 fps
640 x 480	sub-windowed	19.6 fps
640 x 480	sub-sampled	32.4 fps
320 x 240	sub-windowed	39.2 fps
320 x 240	sub-sampled	102 fps

DIMENSIONS



6.9 cm (2.72")

6.5 cm (2.56")

1.86 cm (.725")

1.86 cm (.725")

5.05 cm (2")

8.25 cm (3.25")

Obrázek Příloha 1-1: Technický list kamery CMOS, část 1.

There are five 1/4" 20 (standard) tripod mounting holes centered horizontally / vertically in the top and two sides of the camera body - there are two mounting holes in the bottom. These holes are centered 7.6mm from the front of the camera.

Camera Side View showing front-to-back clearances for camera body, cable connections, and for the flexible interface cable.



Weight:
Only 181 Grams or 5.8 Ounces

Sensor:
Zoran ZR32112PLC (Color)

Imaging Board:
D2X-SV2112C

Optics:
1" C-Mount Lens with 17.526mm Flange Distance

[Back to EPIX Products](#)

Image Processing Products For Research and Industry

Specifications and prices subject to change without notice.

EPIX® imaging products are made in the USA.

Terms of Sale.

Trademark Notices.

Modified:
12-Feb-2013

Copyright © 2013 EPIX, Inc. All rights reserved.

Obrázek Příloha 1-2: Technický list kamery CMOS, část 2.

Příloha 2 – Technický list translačního stolku

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]

Obrázek Příloha2 - 1: Specifikace pohonných jednotek translačního stolku firmy COHERENT. V našem experimentu je využit 25 milimetrový aktuátor (pohonná jednotka) s označením 37-1062.

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

Obrázek Příloha 2-2: Specifikace počítačové karty Encoder Driver Card ovládající translační stolek firmy COHERENT.

Příloha 3 – G kódy ovládající translační stolek

Použité příkazy:

SD – *Set derivative gain* – Tlumení oscilace pohonné jednotky

SG – *Set proportional motor gain* – Nastavení, kolik energie karta využije k dosažení požadované rychlosti

MD – *Macro definition* – Nadefinování makra

SA – *Set acceleration* – Nastavení zrychlení translačního stolku pro dosažení požadované rychlosti

SV – *Set velocity* – Nastavení rychlosti, s jakou se má translační stolek pohybovat

MR – *Move relative* – Vykonání relativního pohybu v daném směru

WS – *Wait for stop* – Pozdržení dalších příkazů, dokud se nezastaví pohonné jednotky

TP – *Tell current position* – Sdělení stávající polohy translačního stolku

MN – *Motor on* – Zapnutí pohonné jednotky

MC – *Macro* – Spuštění požadovaného makra

MF – *Motor off* – Zastavení pohonné jednotku

RC – *Reset counter* – Resetování počítadla

RT – *Reset system* – Resetování (vymazání) paměti

RM – *Reset macros* – Resetování všech maker

Příklady použitých skriptů / příkazů:

RT

%Inicializace systému

RM

RC

1SD500;

1SG50;

%Nastavení pohonných jednotek (aktuátorů)

MD1, 1SA2, 1SV9104, 1MR37830, 1WS100, 1TP;

%Definice makra 1. Jednička před příkazy znamená, že udáváme příkazy pro první aktuátor

MD1, 1SA4, 1SV15607, 1MR-145500, 1WS100, 1TP; %Definice makra 2. Změnou
znaménka se stolek pohybuje na
opačnou stranu

1MN;

MC1;

1MF;

%Samotné spuštění programu pro
dané makro

Příloha 4 – Použité skripty v matematickém software Octave

A: Skript pro výpočet normované funkce vzájemné korelace intenzit ve zvolených řádcích snímků struktur koherenčních zrnitostí

```
clear all;
clc;
pkg load image
obr=im2double(imread("snimek25.tif"));           %Načte snímek struktury koherenční
                                                %zrnitosti reprezentující nulovou polohu
                                                %předmětu
radek=125;                                     %Korelovaný řádek
pocet=50;                                     %Počet korelovaných snímků
p=500;                                         %Rozsah porovnávání

fileID=fopen('data2.txt ','w');               %Otevře textový dokument pro psaní

for i=0:pocet

    obr2=im2double(imread(sprintf("snimek%02d.tif",i))) ; %Načtení prvního až
                                                %posledního snímku struktur
                                                %koherenčních zrnitostí
    x=obr2(radek,:);                           %Vybrání požadovaného řádku
    i1=sum(x)./length(x);                      %Střední hodnota
    l1=x-i1;                                   %Odchylka od střední hodnoty

    xx=obr(radek,:);
    i2=sum(xx)./length(x);

    for i=-p:p                                  %Cyklus pro výpočet vzájemné
                                                %korelace / podobnosti snímků

        if i<0

            xx2=l2(1:1288-abs(i));
            x2=l1(1+abs(i):1288);
            z=1/(length(x)-abs(i));

        else

            x2=l1(1:1288-i);
            xx2=l2(1+i:1288);
            z=1/(length(x)-i);

        endif

    endif
endfor
```

```

c1=z.*(sum(x2.*xx2));
c2=sqrt(z.*sum(x2.^2)).*sqrt(z.*sum(xx2.^2));
r(:,p+1+i)=c1/c2;

endfor

[x ix]=max([r]);
R=sprintf("%.1f",x.*100)
Ax=ix-1-p
fprintf(fileID,'%1.0f ; %s\r\n',Ax,R);

endfor
fclose(fileID);

```

%Maximální hodnota a její pozice
 v jednotkové matici
 %Maximální podobnost
 %Posuv vůči porovnávanému snímku
 %Zápis do textového dokumentu
 %Zavře textový dokument

B: Skript pro interpolaci / fitování dat získaných pomocí normované funkce vzájemné korelace intenzit ve zvolených řádcích snímků struktur koherenčních zrnitostí

```

clc;
clear all;
data=(dlmread("data2.txt",";"));
set(0,"defaultaxesfontname","Helvetica");
y=data(:,2);
x1=-500:20:500;

p0=[3 -1 2 4 5];
p=polyfit(transpose(x1),y,4);

fit=polyval(p,transpose(x1));

plot(x1,y,":;data;","markersize",15,x1,fit,";fit;")
set(gca,"xtick",-600:100:600);
set(gca,"ytick",85:1:100);
grid on

set(gca,"xlabel",text("string","\it a_{x real} \rm [\\mum]","fontsize",15))
set(gca,"ylabel",text("string","\it r_{\\rm 1,2} \rm [%]","fontsize",15))

print -djpg image.jpg

```

%Načtení textového dokumentu se stupni korelace
 %Na *souřadné* ose x není vypočtená hodnota, ale teoretický posuv stolku
 %Náhodné počáteční koeficienty polynomu
 %Vytvoření polynomu 4. stupně pro interpolaci v závislosti na datech
 %Interpolace dat polynomem 4. stupně
 %Zobrazení dat a interpolace v grafu
 %Nastavení kroku na *souřadné* ose x
 %Nastavení kroku na *souřadné* ose y
 %Zapnutí mřížky závislé na krocích na obou *souřadných* osách
 %Popisek *souřadné* osy x s upraveným fontem a velikostí písma
 %Popisek *souřadné* osy y
 %Uložení vytvořeného grafu ve formátu jpg