

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza tvaru zrna ve struktuře koherenční zrnitosti

Autor:

Bc. Miloš Pospěch

Vedoucí diplomové práce:

RNDr. Petr Šmíd, Ph.D.

Studijní obor:

Aplikovaná fyzika

Forma studia:

Prezenční

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Bc. Miloš Pospěch
Název práce:	Analýza tvaru zrna ve struktuře koherenční zrnitosti
Typ práce:	Magisterská
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	RNDr. Petr Šmíd, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2010
Počet stran:	70
Počet příloh:	1
Jazyk:	Čeština
Abstrakt:	Šest různých, odrazem laserového svazku od drsného předmětu vytvořených, polí koherenční zrnitosti bylo skenováno CCD kamerou. Z pořízených snímků byly v programu MATLAB složeny prostorové modely zrn koherenční zrnitosti a byly porovnávány teoretické a zjištěné střední rozměry zrn. Tvar zrn i jejich střední velikosti byly v dobré shodě s teoretickými předpoklady.
Klíčová slova:	koherenční zrnitost, zrno koherenční zrnitosti, MATLAB, počítačové modelování

Bibliographical identification

Author's first name and surname: Bc. Miloš Pospěch

Title: Shape Analysis of a Speckle in Speckle Pattern

Type of thesis: Master

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: RNDr. Petr Šmíd, Ph.D.

Year of presentation: 2010

Number of pages: 70

Number of appendices: 1

Language: Czech

Abstract: Six different speckle patterns created when a laser beam was scattered off a rough surface were scanned using a CCD camera. The pictures were put together in MATLAB and the speckles were modeled. Also theoretical and measured speckle sizes and shape were compared. There were observed a great agreements between them.

Keywords: speckle pattern, speckle, MATLAB, computer simulation

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Petra Šmída, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci.....

.....

podpis

Chtěl bych tímto velice poděkovat svému vedoucímu práce, RNDr. Petru Šmídovi, Ph.D., především za jeho čas, rady a připomínky, které mi v posledních dvou letech věnoval, a také za obrovskou trpělivost, kterou se mnou po celou dobu měl. Můj dík patří také Assoc.Prof. Kristu Gernaeymu, za pomoc při práci v programu MATLAB.

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	12
1 Teoretický úvod	13
1.1 Základní pojmy	13
1.1.1 Světelná vlna	13
1.1.2 Polarizace	13
1.1.3 Interference	14
1.1.4 Koherence	14
1.1.5 Kontrast	15
1.2 Koherenční zrnitost.....	15
1.2.1 Vznik struktury koherenční zrnitosti.....	15
1.2.2 Vlastnosti struktury koherenční zrnitosti a jejich důsledky	16
1.2.3 Využití koherenční zrnitosti.....	22
1.3 MATLAB	23
1.4 Cíle práce a postup jejich realizace	24
2 Experimentální část - snímání a modelování interferenčních zrn	26
2.1 Laboratorní uspořádání.....	26
2.2 Detekce pole koherenční zrnitosti	30
2.3 Zpracování dat a vykreslení zrn.....	31
3 Výsledky a diskuze	37
3.1 Teoretické hodnoty	37
3.1.1 Stopa laseru na předmětu	37
3.1.2 Střední velikosti zrn	37
3.2 Experimentální hodnoty	39
3.2.1 Laserový svazek dopadající na odrazný předmět pod úhly 10°, 15° a 20°	41
3.2.2 Laserový svazek dopadající kolmo na odrazný předmět	49
3.3 Diskuze	57
Závěr.....	61
Seznam použitých zdrojů.....	62

Seznam použitých symbolů a zkratk	66
Příloha 1. Modely zrn pozorovaných při kolmém dopadu laserového svazku na odrazný předmět	68

Seznam obrázků

Obr. 1. Chování vektoru intenzity \vec{E} elektrického pole při šíření a) nepolarizovaného, b) lineárně polarizovaného, c) elipticky polarizovaného a d) kruhově polarizovaného světla šířícího se ve směru osy z.....	14
Obr. 2. Znárodnění odrazu koherentního záření od drsného povrchu předmětu a následného skládání odražených vln	16
Obr. 3. Struktura koherenční zrnitosti zaznamenaná na stínítku, upraveno z [6]	16
Obr. 4. Funkce hustoty pravděpodobnosti, upraveno z [5]	17
Obr. 5. Šíření zrn ve struktuře koherenční zrnitosti, upraveno z [7]	18
Obr. 6. Hledání hranic zrn pomocí Cannyho hranového detektoru.....	19
Obr. 7. Prahování obrazu struktury koherenční zrnitosti, upraveno z [13]	20
Obr. 8. Šíření laserového svazku při průchodu ploskovypuklou čočkou.....	20
Obr. 9. Laserový svazek šířky d , dopadající na rovinu předmětu pod úhlem α	21
Obr. 10. Pracovní okno programu MATLAB [31]	24
Obr. 11. Skládání CT snímků [32]	25
Obr. 12. Laserový svazek dopadající v laboratoři na hliníkový předmět, a následně generující strukturu koherenční zrnitosti.....	26
Obr. 13. Schematické uspořádání komponent použité pro detekci pole koherenční zrnitosti; kolmo dopadající laserový svazek.....	28
Obr. 14. Laboratorní uspořádání pro detekci struktury koherenční zrnitosti	28
Obr. 15 Schematické uspořádání komponent použité pro detekci pole koherenční zrnitosti; laserový svazek dopadající na předmět pod nenulovým úhlem	29
Obr. 16. Vykreslení snímku načteného do pracovního prostředí programu MATLAB ze souboru typu asc.....	32
Obr. 17. Výsledek prahování snímku s hodnotou prahu odpovídající dvojnásobku střední intenzity	33

Obr. 18. 10/Snimek050T/400-800,650-1050 a) s dvěma vyznačenými překrývajícími se zrna, b) bez překrývajících se zrn.....	34
Obr. 19. a) První (10/Snimek040T/193-274,411-525), b) prostřední (10/Snimek048T/193- 274,411-525,) a c) poslední (10/Snimek056T/193-274,411-525,) snímek zrna	34
Obr. 20. Izolování zrna ve snímku 10/Snimek048T/193-274,411-525.....	35
Obr. 21. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 10° na povrch předmětu.....	40
Obr. 22. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 15° na povrch předmětu.....	40
Obr. 23. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 20° na povrch předmětu.....	40
Obr. 24. Model dvou dotýkajících se zrn z Obr. 21 a) 1.....	41
Obr. 25. Model dvou dotýkajících se zrn z Obr. 21 a) 2.....	41
Obr. 26. Snímek 10/Snimek050T.....	42
Obr. 27. Snímek 15/Snimek050T.....	42
Obr. 28. Snímek 20/Snimek050T.....	43
Obr. 29. Ve snímcích a) 10/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 10/Snimek050T/400-800,650- 1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice	43
Obr. 30. Ve snímcích a) 15/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 15/Snimek050T/400- 800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice.....	44
Obr. 31. Ve snímcích a) 20/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 20/Snimek050T/400- 800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice.....	44
Obr. 32. Snímek K10/Snimek050T.....	50
Obr. 33. Snímek K15/Snimek050T.....	50
Obr. 34. Snímek K20/Snimek050T.....	51
Obr. 35. Ve snímcích a) K10/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K10/Snimek050T/400- 800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice.....	51
Obr. 36. Ve snímcích a) K15/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K15/Snimek050T/400- 800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice.....	52
Obr. 37. Ve snímcích a) K20/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K20/Snimek050T/400- 800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice.....	52

Seznam tabulek

Tab. 1. Střední rozměry interferenčních zrn ve vzdálenostech 30 cm, 35 cm resp. 40 cm od odrazného předmětu osvětleného laserovým svazkem vytvářejícím na povrchu předmětu kruhovou stopu.....	37
Tab. 2. Střední rozměry poloos eliptického průřezu zrna při dopadu laserového svazku na odrazný povrch předmětu pod úhly 10°, 15° resp. 20° ve vzdálenostech 30, 35 a 40 cm od odrazného povrchu předmětu	38
Tab. 3. S rostoucí vzdáleností od předmětu klesající tendence střední intenzity snímku	41
Tab. 4. Délky vybraných zrn ve snímku 10/Snimek050T.....	45
Tab. 5. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 10/Snimek050T	46
Tab. 6. Délky vybraných zrn ve snímku 15/Snimek050T.....	47
Tab. 7. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 15/Snimek050T	47
Tab. 8. Délky vybraných zrn ve snímku 20/Snimek050T.....	48
Tab. 9. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 20/Snimek050T	49
Tab. 10. S rostoucí vzdáleností od předmětu klesající tendence střední intenzity snímku	49
Tab. 11. Délky vybraných zrn ve snímku K10/Snimek050T.....	53
Tab. 12. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K10/Snimek050T.....	53
Tab. 13. Délky vybraných zrn ve snímku K15/Snimek050T.....	54
Tab. 14. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K15/Snimek050T.....	55
Tab. 15. Délky vybraných zrn ve snímku K20/Snimek050T.....	56
Tab. 16. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K20/Snimek050T.....	56
Tab. 17. Počet nalezených zrn, z kterých byly počítány střední rozměry zrn, při různých uspořádáních měřicí soustavy	57
Tab. 18. Počet zaznamenaných světlých plošek ve vzdálenosti 35 cm od povrchu předmětu, při různých uspořádáních měřicí soustavy	57
Tab. 19. Střední intenzity zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu při různých uspořádáních měřicí soustavy.....	58

Tab. 20. Teoretické i za různých uspořádání měřené střední podélné rozměry zrn objevujících se vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu.....	58
Tab. 21. Střední podélné rozměry zrn z Tab. 20 přepočtené pro středy zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu	59
Tab. 22. Teoretické a zjištěné střední příčné rozměry vybraných zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu	59
Tab. 23. Teoretické a zjištěné střední příčné rozměry zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu při uvažování všech světých ploch ve snímcích struktury koherenční zrnitosti.....	60

Úvod

Jev koherenční zrnitosti je každému, kdo někdy v laboratoři pracoval s laserem, dobře znám. Vzniká totiž například po dopadu laserového svazku na drsný povrch předmětu a je detekován v poloprostoru před tímto předmětem, kde na stínítku generuje svou typickou zrnitou strukturu. V mnoha případech je pozorovaná struktura koherenční zrnitosti nežádoucím, parazitním jevem, ale kromě toho existuje také velké množství aplikací, ve kterých se koherenční zrnitost naopak uplatní.

I když si to možná spousta lidí ani neuvědomuje, struktura koherenční zrnitosti není tvořena světlými ploškami, ale světlými prostorovými objekty, kterým se říká zrna koherenční zrnitosti. Cílem této diplomové práce je izolovat ve struktuře koherenční zrnitosti jednotlivá zrna, prostorově vyobrazit a porovnat, zda se zjištěné rozměry zrn shodují s jejich teoretickými hodnotami.

Statistický charakter jevu koherenční zrnitosti má za následek, že se v případě rozměrů zrn hovoří o jejich středních hodnotách. Pro určení středních velikostí (příčné a podélné) zrn bude tedy potřeba nalézt větší počet zrn a jejich rozměry zprůměrovat.

Autor nezjistil, že by se doposud někdo modelováním zrn koherenční zrnitosti zabýval, zaznamenal pouze obrázky „dokonalých“, hladkých zrn, nasimulovaných v počítači z teoretických předpokladů.

1 Teoretický úvod

1.1 Základní pojmy

Koherenční zrnitost je optický jev, k jehož popisu je užitečné nejdříve zmínit několik základních pojmů, jako jsou světelná vlna, optická intenzita, interference, koherence a kontrast.

1.1.1 Světelná vlna

Světlo je elektromagnetické vlnění, viditelné lidským okem, tedy kmitající s frekvencí přibližně mezi $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz a $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz [1]. Monochromatická vlna je reprezentována vlnovou funkcí s harmonickým průběhem

$$u(\vec{r}, t) = a(\vec{r}) \cos[2\pi\nu t + \varphi(\vec{r})], \quad (1)$$

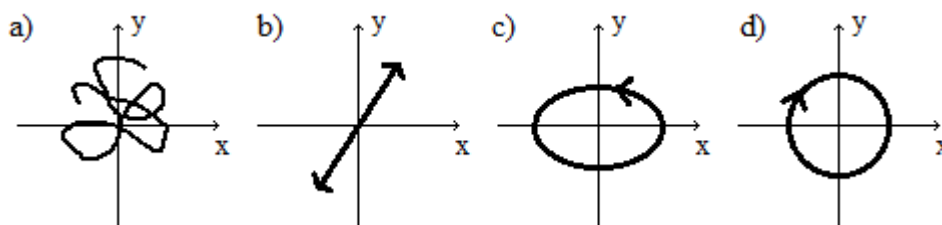
kde $a(\vec{r})$ je amplituda vlny, $\varphi(\vec{r})$ fáze, t čas a ν frekvence.

Někdy je výhodné vzorec (1) převést do komplexního tvaru s komplexní amplitudou $U(\vec{r}, t)$:

$$u(\vec{r}, t) = \operatorname{Re}\{U(\vec{r}, t)\} = \operatorname{Re}\{U(\vec{r}) \exp(i2\pi\nu t)\} \quad (2)$$

1.1.2 Polarizace

Světlo je elektromagnetické vlnění příčné, tudíž vektor intenzity \vec{E} elektrického pole je kolmý na směr šíření světelné vlny (Obr. 1). V případě nepolarizovaného světla se směr vektoru \vec{E} mění náhodně. Polarizované světlo má řadu zajímavých vlastností a rozlišujeme ho podle chování vektoru \vec{E} na lineárně (vektor \vec{E} kmitá v jedné rovině), elipticky (vektor \vec{E} v rovině kolmé na směr šíření opisuje elipsu) nebo kruhově (vektor \vec{E} v rovině kolmé na směr šíření opisuje kružnici) polarizované [2].



Obr. 1. Chování vektoru intenzity \vec{E} elektrického pole při šíření a) nepolarizovaného, b) lineárně polarizovaného, c) elipticky polarizovaného a d) kruhově polarizovaného světla šířícího se ve směru osy z

1.1.3 Interference

Při současné přítomnosti dvou nebo více optických vln v místě prostoru je celková vlnová funkce rovna součtu jednotlivých vlnových funkcí [1, 2]. Tento princip superpozice neplatí pro optickou intenzitu definovanou jako součin komplexní amplitudy s komplexně sdruženou komplexní amplitudou

$$I(\vec{r}) = |U(\vec{r})|^2 = U(\vec{r})U^*(\vec{r}). \quad (3)$$

Intenzita dvou nebo více složených vln obecně není, díky interferenci, rovna součtu jejich intenzit. V případě interference dvou vln se stejnou frekvencí, šířících se stejným směrem, se stejnou rovinou polarizací, je výsledná intenzita I v bodě prostoru rovna

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

kde I_1 a I_2 jsou intenzity první a druhé vlny a $\Delta\varphi$ je jejich fázový rozdíl. V závislosti na fázovém rozdílu dochází k tzv. konstruktivní resp. destruktivní interferenci v případě, že je poslední člen v rovnici (4) kladný resp. záporný.

1.1.4 Koherence

Koherence záření vypovídá o kvalitě použitého zdroje, je popsána korelací mezi vlnami. Ideální koherentní zdroj je monochromatický, bodový a jeho rozdíl fází vyzařovaných vln je konstantní. Ve skutečnosti nejsou zdroje dokonale monochromatické ani bodové, amplituda i fáze jejich vln se mění. Koherenci zdroje je možné ovlivnit změnou monochromatickosti a zmenšením vyzařovací plochy [1, 2].

V případě tzv. časové koherence, je definována koherenční délka záření l_c

$$l_c = \frac{c}{\Delta f}, \quad (5)$$

kde c je rychlost šíření světla a rozdíl frekvencí Δf odpovídá rozsahu vyzařovaných frekvencí zdroje. Koherenční délka záření je rovna vzdálenosti od zdroje, ve které už jej nelze považovat za koherentní.

Prostorová koherence může být popsána rovnicí

$$l_s = \frac{\lambda}{\theta}, \quad (6)$$

kde l_s je velikost prostorové koherence, λ vlnová délka záření a θ úhel mezi dvěma zdroji světla z bodu pozorování. Ze vztahu (6) plyne, že prostorová koherence se, na rozdíl od časové koherence, s rostoucí vzdáleností od zdroje (zdrojů) zvětšuje.

1.1.5 Kontrast

Z rovnice (4) je patrné, že celková intenzita I je největší (resp. nejmenší) v případě, kdy je člen $\cos(\Delta\varphi)$ roven jedné (resp. minus jedné). Kontrast C definovaný podílem rozdílu a součtu maximální a minimální intenzity

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (7)$$

může být využitím vztahu (4) vyjádřen jako

$$C = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}, \quad (8)$$

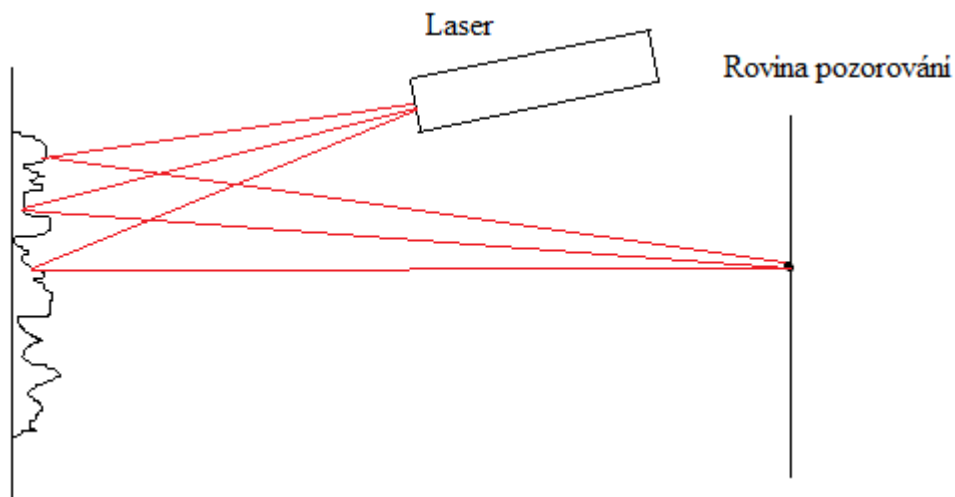
kde $0 \leq C \leq 1$ [3].

1.2 Koherenční zrnitost

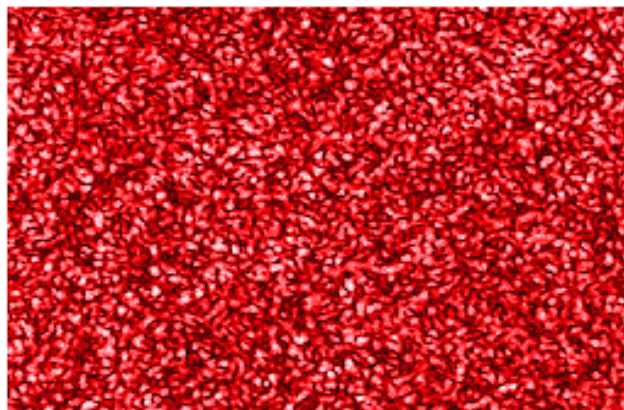
1.2.1 Vznik struktury koherenční zrnitosti

Koherenční zrnitostí nazýváme jev, který nastává při interferenci koherentního nebo částečně koherentního světla buďto odraženého od drsného povrchu předmětu nebo procházejícího takovým předmětem [4]. Drsný povrch předmětu je možné si představit jako povrch složený z mnoha malých, různě uspořádaných plošek. Dopadající záření (Obr. 2) se odráží od velkého počtu těchto různých plošek, odražené vlny spolu interferují v poloprostoru před předmětem a při dopadu na stínítko vzniká světlá, zrnitá struktura, která dává jevu jeho název koherenční zrnitost (Obr. 3) [5]. Při průchodu předmětem dochází ke skládání vlnění vznikajících rozptylem na náhodně rozložených rozptylujících částicích. Strukturu koherenční

zrnitosti je možno pozorovat také při průchodu koherentního světla prostředím s náhodnými fluktuacemi lomu, jakým je například zemská atmosféra.



Obr. 2. Znárodnění odrazu koherentního záření od drsného povrchu předmětu a následného skládání odražených vln



Obr. 3. Struktura koherenční zrnitosti zaznamenaná na stínítku, upraveno z [6]

1.2.2 Vlastnosti struktury koherenční zrnitosti a jejich důsledky

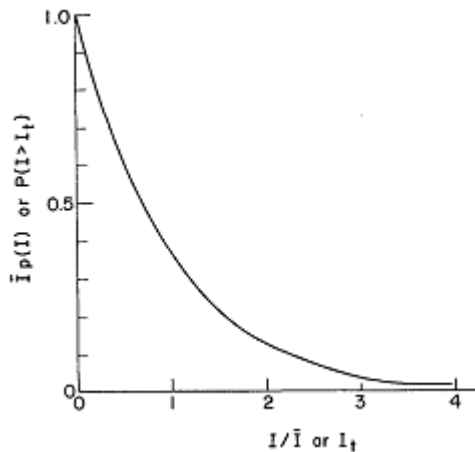
Koherenční zrnitost má statistický charakter, který od jisté hodnoty drsnosti, pro danou vlnovou délku použitého světla, nezávisí na detailech povrchu předmětu, a lze jí popsat metodami matematické statistiky [4]. Statistické vlastnosti prvního řádu ukazují, že pro plně vyvinuté pole koherenční zrnitosti, což je pole polarizované a koherentní, se intenzita řídí exponenciálním pravděpodobnostním rozdělením se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou rovnou střední hodnotě intenzity

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

fáze má rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení v intervalu $\langle -\pi, \pi \rangle$

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad (10)$$

a intenzita a fáze jsou v libovolném bodě nezávislé. Z grafu hustoty pravděpodobnosti na Obr. 4 plyne, že nejpravděpodobnější naměřená hodnota intenzity v daném bodě je nula, tedy, že na stínítku či kamerou bude pozorován černý bod [3, 4, 7].



Obr. 4. Funkce hustoty pravděpodobnosti, upraveno z [5]

Poměr signálu k šumu je definován jako podíl střední hodnoty a směrodatné odchylky intenzity

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle I \rangle}{\sigma_I} = 1. \quad (11)$$

Koherenční zrnitost je silně zašuměný proces, kde odchylky signálu jsou v průměru rovny střední hodnotě samotného signálu [3]. Odlišit zrna od šumu, neboli nalézt ve snímku struktury koherenční zrnitosti hranice jednotlivých zrn, tedy vyžaduje jisté kroky ve zpracování obrazu, které budou uvedeny v kapitole 1.2.2.1.

Kontrast je roven převrácené hodnotě poměru signálu k šumu, tedy také roven jedné, a viditelnost zrn je díky tomu velmi dobrá [5].

Interferenční zrna vycházejí ze středu laserem osvětlené plochy, jejich podélný rozměr je větší než příčný, a svým protažením připomínají tvar doutníku (Obr. 5) [7, 10].

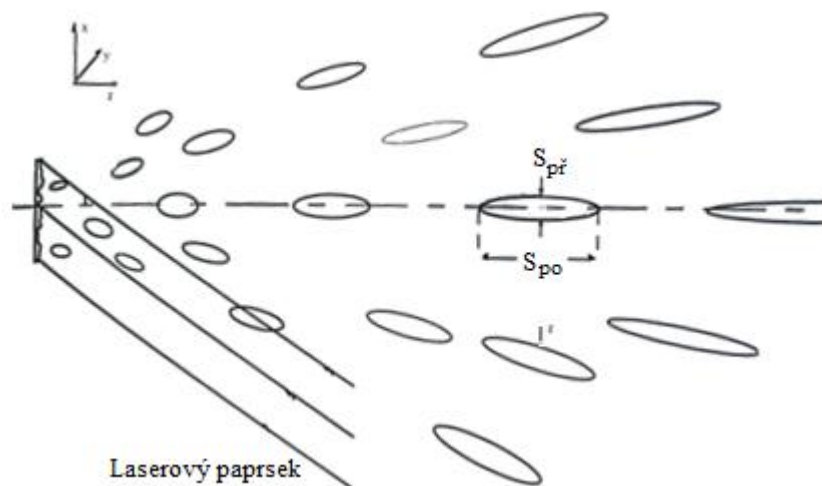
Statistika druhého řádu ukazuje [7], že v případě osvětlení předmětu rovnoměrnou kruhovou stopou se střední hodnota délky příčného rozměru zrna dá vyjádřit jako

$$S_{př} = \lambda \frac{z}{D}, \quad (12)$$

kde λ je vlnová délka použitého záření, z je vzdálenost roviny pozorování od předmětu a D průměr osvětlené plochy předmětu. Pro střední podélný rozměr zrna, pravouhle promítnutý na osu kolmou k rovině předmětu, platí vztah

$$S_{po} = 4\lambda \left(\frac{z}{D} \right)^2. \quad (13)$$

V praxi je tyto rozměry kvůli složité náhodné struktury koherenční zrnitosti těžké zaručit [8, 9], existuje také více variant těchto vzorců, lišících se podle způsobu jejich odvození. Jiný vztah je uváděn na základě metody korelace polí a jiný při zrnu uvažovaném jako oblast koherence a koherenčních délek S_{po} a $S_{př}$ [7]. V podstatě se však nalezené vzorce liší pouze číselnými konstantami na prvních místech. Z uvedených vztahů je patrné, že čím bude osvětlená stopa na předmětu větší, tím budou rozměry zrna menší. V případě osvětlení drsného předmětu ne kruhovou, ale eliptickou stopou, bude tedy příčný řez zrnem mít namísto kruhu tvar elipsy s poloosami otočenými o 90° oproti poloosám elipsy světelné stopy. Dalším poznatkem, který lze ze vzorců vyčíst, je, že střední velikosti zrna mohou být měněny buďto změnou zdroje záření (změnou vlnové délky vyzařovaného vlnění) nebo snadněji změnou velikosti osvětlené stopy laseru na předmětu, čehož lze jednoduše docílit umístěním optické čočky mezi zdroj záření a drsný předmět (kapitola 1.2.2.2).

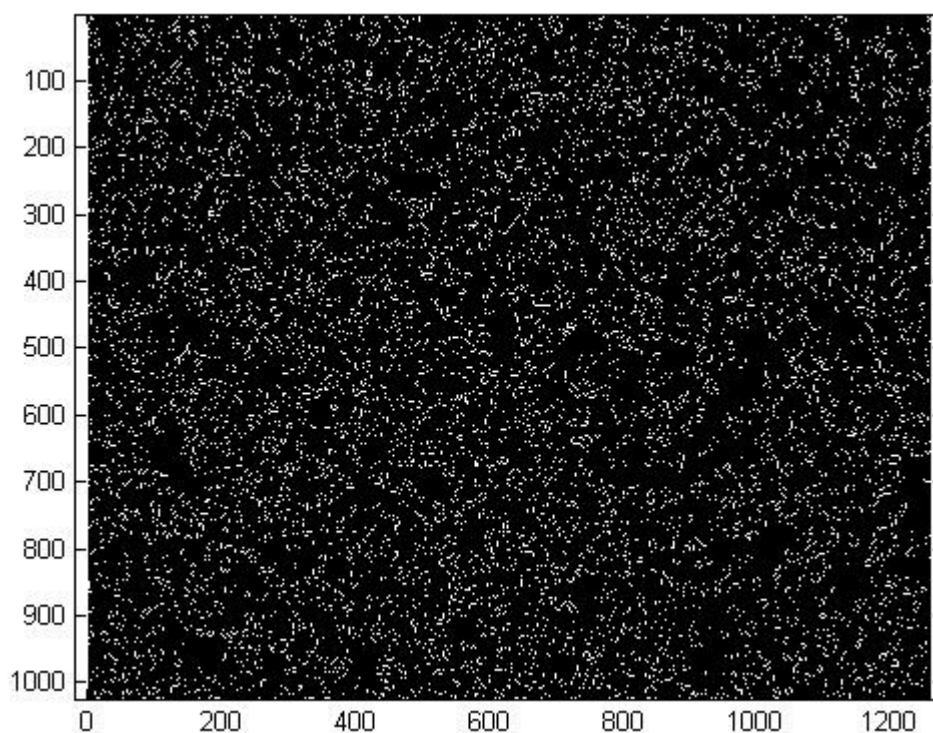


Obr. 5. Šíření zrn ve struktuře koherenční zrnitosti, upraveno z [7]

Jsou rozlišovány dva druhy polí koherenční zrnitosti: subjektivní a objektivní. Subjektivní pole je deformované průchodem čočkou a objektivní pole je pozorováno bez použití optické čočky [3, 7].

1.2.2.1 Stanovení hranice zrna

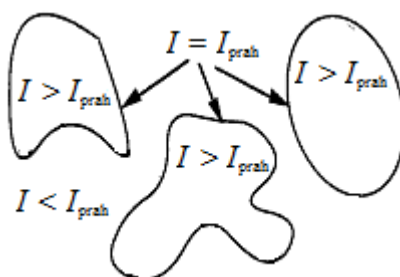
Dílčím úkolem v diplomové práci bylo nalézt ve snímcích podobných těm na Obr. 3 hranice jednotlivých průřezů zrn. Z důvodu velkého poměru signálu k šumu byla tato úloha poměrně složitá. První pokusy o určení hranic zrn vedly přes matematickou morfologii [11, 12]. Jako její nejúčinnější nástroj se nabízel tzv. Cannyho hranový detektor skládající se ze 4 kroků: eliminace šumu Gaussovým filtrem, určení gradientu pomocí první derivace, nalezení lokálních maxim ztenčením a eliminace nevýznamných hran prahováním. Použití Cannyho detektoru však nebylo pro pole koherenční zrnitosti vůbec vhodné, viz Obr. 6. Hraniční čáry byly neuzavřené křivky, které navíc neohraničovaly pouze světlá zrna, ale také tmavé oblasti.



Obr. 6. Hledání hranic zrn pomocí Cannyho hranového detektoru

Nejlepším řešením k odstranění šumu a nalezení hranic zrn bylo použití samotného prahování (Obr. 7) [13]. Prahování je funkce, která má na výstupu dvě různé hodnoty podle toho, zda je vstup menší, než zvolený práh, nebo naopak. Velikost zvoleného prahu je pro

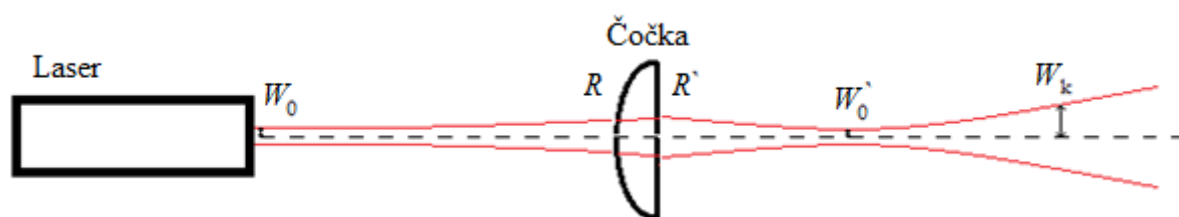
snímky struktury koherenční zrnitosti nastavována, dle [13] na minimálně dvojnásobek střední intenzity snímku.



Obr. 7. Prahování obrazu struktury koherenční zrnitosti, upraveno z [13]

1.2.2.2 Laserem osvětlená plocha na odrazném předmětu

Laserový paprsek není dokonale kolimovaný a jeho průřez se tak s rostoucí vzdáleností od zdroje zvětšuje. Také při záměrném manipulování s rozměry osvětlené stopy laseru je třeba matematicky určit její velikost. Šíření laserového, tedy gaussovského svazku může být popsáno zákony svazkové optiky [1]. Poloměr svazku, nazývaný též pološířkou, je definován jako poloměr oblasti, ve které se šíří 86 % výkonu. Pokud je do cesty mezi zdroj záření a odrazný předmět umístěna tenká optická čočka, světelný paprsek se chová tak, jako je naznačeno na Obr. 8.



Obr. 8. Šíření laserového svazku při průchodu ploskovypuklou čočkou

Pološířka gaussovského svazku v místě maximálního zúžení svazku W_0 se počítá ze vztahu

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

kde z_0 je tzv. Rayleighova vzdálenost. V praxi je pološířka svazku W_0 známá z katalogového listu laseru a vzorec slouží k určení Rayleighovy vzdálenosti. S rostoucí vzdáleností z_p od tohoto místa se ve směru šíření paprsku zvětšuje pološířka svazku W podle vzorce

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z_p}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Poloměr křivosti vlnplochy R , ve vzdálenosti z_p , závisí pouze na Rayleighově vzdálenosti a této vzdálenosti:

$$R(z) = z_p \left[1 + \left(\frac{z_0}{z_p} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Po průchodu tenkou čočkou se poloměr křivosti svazku R změní na R' v souladu s rovnicí

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} - \frac{1}{f}, \quad (17)$$

kde f je ohnisková vzdálenost tenké čočky. Za čočkou se bude svazek fokusovat ve vzdálenosti z_p'

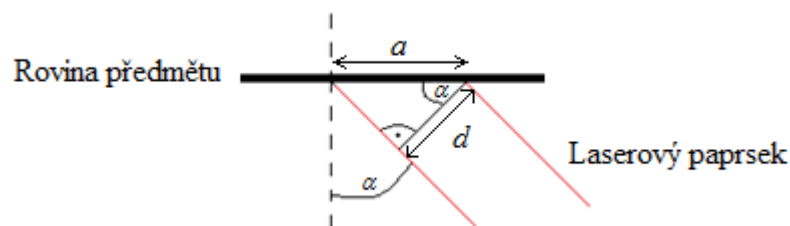
$$z_p' = \frac{-R'}{1 + \left(\frac{\lambda R'}{\pi W^2} \right)^2} \quad (18)$$

a v tomto místě maximálního zúžení bude mít pološířku W_0'

$$W_0' = \frac{W}{\left[1 + \left(\frac{\pi W^2}{\lambda R'} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (19)$$

S rostoucí vzdáleností se bude pološířka svazku W_k opět zvětšovat a její velikost je možné vypočítat užitím modifikovaných vzorců (14) a (15).

Pokud nebude světelný paprsek dopadat na odrazný předmět kolmo, nebude jeho stopa na předmětu kruhová, ale eliptická v závislosti na úhlu dopadu viz Obr. 9.



Obr. 9. Laserový svazek šířky d , dopadající na rovinu předmětu pod úhlem α

Dopadá-li laserový svazek o průměru d na rovinu předmětu pod úhlem α , bude mít hlavní poloosa eliptické stopy velikost

$$a = \frac{d}{\cos \alpha}. \quad (20)$$

Střední velikosti zrna jsou nepřímo úměrné rozměrům osvětlené plochy na povrchu předmětu. Pokud tedy hlavní poloosa leží v horizontální rovině, příčné řezy zrny budou mít také tvar elipsy, ale naopak s hlavní poloosou v rovině vertikální.

1.2.3 Využití koherenční zrnitosti

Jedno z prvních zaznamenaných pozorování struktury koherenční zrnitosti bylo provedeno K. Exnerem v roce 1877, který nechal procházet světlo svíčky přes skleněnou desku, jenž zmatnil svým dechem [4]. Po vynálezu laseru kolem roku 1960 se koherenční zrnitost stala silným parazitním jevem pozorovaným při odrazu laserového svazku od povrchů předmětů. V dalších letech byla tomuto jevu věnována pozornost a bylo objeveno také mnoho jeho možných využití. V řadě případů, např. i při čtení tzv. SAR snímků (snímků z radaru se syntetickou aperturou) je však struktura koherenční zrnitosti stále na obtíž a jsou hledány nové a nové způsoby, jak se s ní vypořádat [14, 15, 16]. Většinou pak pomocí počítačových algoritmů.

Mezi běžné metody využívající koherenční zrnitosti patří korelace polí koherenční zrnitosti, fotografie na bázi koherenční zrnitosti nebo interferometrie na bázi koherenční zrnitosti [4, 17]. Jejich použitím je možné určovat hloubku předmětů, jejich tvar, v případě průhledných vzorků tloušťku [18], drsnost [19], posunutí [20], chvění, tenzor deformace [3] a další. Fotografie na bázi koherenční zrnitosti má potenciál při sledování chování proudění tepla laminárních i turbulentních toků plynů (též ohně) a kapalin [21]. Své využití má studium koherenční zrnitosti také v astronomii k zobrazení a popisu planet nacházejících se mimo sluneční soustavu blízko své mateřské hvězdy [22] nebo ke hledání dvojhvězd [4]. Pole koherenční zrnitosti může být aplikováno ke zvýšení rozlišení optického systému limitovaného numerickou aperturou čočky [23] nebo zachycení úzké velikostní distribuce částic ve vzduchu [24], z většího počtu intenzitních snímků pořízených odrazem od difúzního povrchu lze sestavit jeho obraz [25, 26].

Obdobná struktura jako při odrazu laserového světla je pozorována v případě ultrazvukového záření, jen zrna se místo kamerou detekují mikrofonom, mohou se nacházet v pevných látkách a nejsou snadno ovlivnitelné prostředím [27]. Nahrazením monochromatického světla vlnami o dvou a více vlnových délkách je možné vytvářet naprosto odlišné struktury koherenční zrnitosti s novými vlastnostmi [28, 29].

Při vizualizaci obrázků struktur koherenční zrnitosti závisí její kontrast velmi na nastavení měřicí soustavy. Pokud mají být různé snímky porovnatelné, je nutné zavést jistý standart týkající se např. expoziční doby a velikosti pixelů kamery, který dnes není [30]. Nastavení parametrů měření je tedy volitelné.

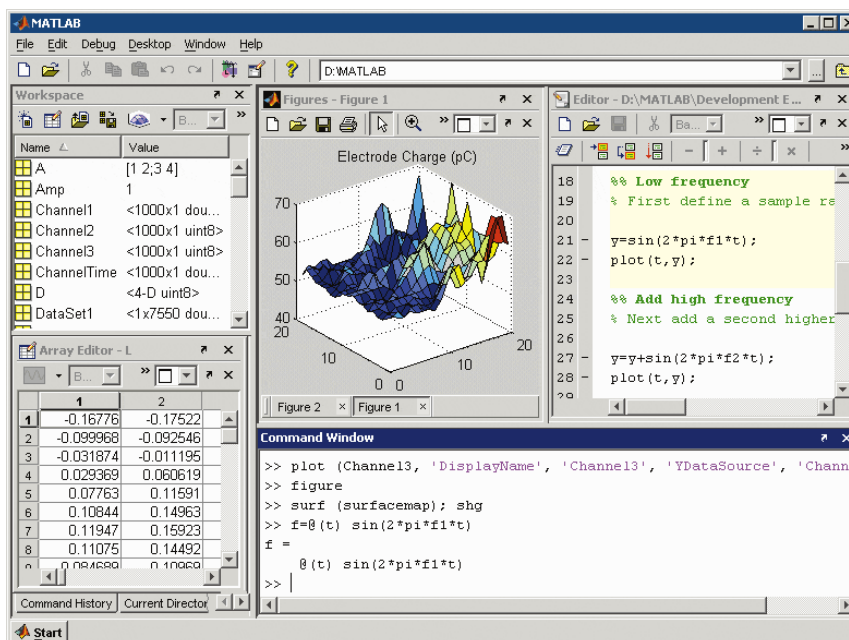
1.3 MATLAB

Dle [31] je MATLAB (z anglického MATrix LABoratory) velmi rozšířený technický programovací jazyk na vysoké úrovni a programové prostředí pro algoritmicizaci, vizualizaci a analýzu dat a numerické výpočty. Použití MATLABu šetří v mnoha případech čas a je pohodlnější než práce s jazyky jako je C, C++ či Fortran. Má široké uplatnění pro zpracování signálu a obrazu, komunikaci, návrh řízení, kontrolní a měřicí systémy, finanční analýzu a modeling a výpočty v biologii. První verze MATLAB 1.0 se na trhu objevila v roce 1984, o deset let později již MATLAB 4.2c fungoval pod operačním systémem Windows. V současné době je k dispozici 31. verze programu MATLAB 7.10.

Je možné ho použít v celém procesu měření či analýzy dat [31], od získání dat z externích zařízení nebo databází přes předzpracování, vizualizaci a numerickou analýzu až k vytvoření výstupů vhodných k prezentaci.

Programové prostředí lze k řešení specifických úloh rozšiřovat pomocí přídatných nástrojových sad. Kód MATLABu může být snadno integrován s jinými programovacími jazyky a aplikacemi.

Již z názvu je patrné, že MATLAB je stvořený pro práci s maticemi. Práce v něm je velmi rychlá, není nutné provádět banální úkony jako je například deklarování proměnných. Také obsahuje velké množství funkcí z různých oblastí, které již není třeba znovu programovat, ale stačí je vyvolat jednoduchým příkazem na jednom řádku [31].

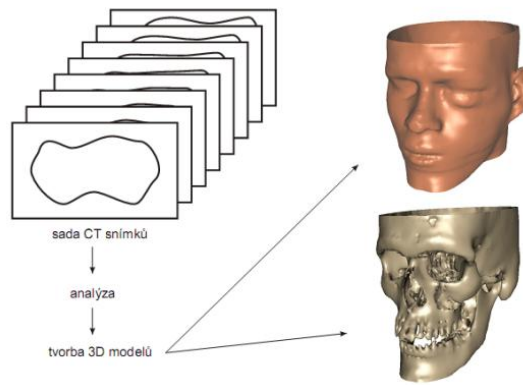


Obr. 10. Pracovní okno programu MATLAB [31]

1.4 Cíle práce a postup jejich realizace

Cílem diplomové práce je v polích koherenční zrnitosti, generovaných při různých laboratorních podmínkách, s využitím programu MATLAB, nalézt postup, jak analyzovat tvar interferenčních zrn a také porovnat střední rozměry zrn s jejich teoretickými hodnotami danými vztahy (12) a (13).

Struktura koherenční zrnitosti vzniká v poloprostoru před použitým předmětem a je ji možno detekovat při dopadu na stínítko či CCD čip kamery. K získání informací o prostorovém uspořádání světlých a tmavých míst byla použita kamera připevněná k posuvnému stolku, jehož pomocí bylo s kamerou pohybováno ve směru šíření světla. Při zvoleném kroku posunutí tak bylo možné získávat sled dvourozměrných dat, který vytvářel rozměr třetí. Jedná se o obdobný postup, kterým se například v lékařství skládají tzv. CT snímky, z nichž je takto možné vytvářet modely kostí.



Obr. 11. Skládání CT snímků [32]

V počítači byly pořízené snímky upraveny v programu MATLAB, ve kterém byla také složena jednotlivá zrna do prostorových modelů. Jelikož má struktura koherenční zrnitosti statistický charakter, hovoří se v případě rozměrů zrn o středních hodnotách, a je tak nutné pracovat s větším počtem zrn a uvažovat jejich průměrné hodnoty.

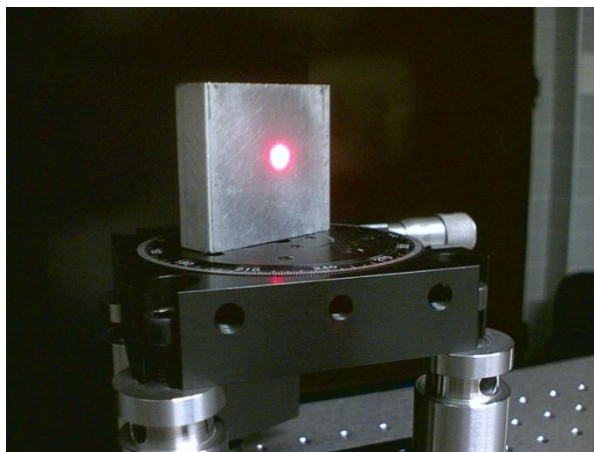
2 Experimentální část - snímání a modelování interferenčních zrn

Rozložení intenzity světla na jednotlivých pixelech kamery byly zaznamenávány příslušným počítačovým softwarem XCAP. Následně byly zachycené snímky importovány do programu MATLAB. V upravených snímcích byla izolována jednotlivá zrna, sloučena do prostorové matice a nakonec i vykreslena.

2.1 Laboratorní uspořádání

Všechny komponenty potřebné k měření byly z důvodu velké citlivosti na vibrace uspořádány v laboratoři na antivibračním stole Melles Griot. Jako zdroj světelného paprsku byl použit HeNe laser Lasos LGK 7665 P18 vyzařující polarizované červené světlo o vlnové délce 632,8 nm a průměru ≤ 1 mm.

První pokusy o detekci struktury koherenční zrnitosti probíhaly v uspořádání, jež vytvářelo interferenční zrna po průchodu laseru difúzním předmětem. Brzy se však ukázalo, že tato zrna s rostoucí vzdáleností velmi rychle mizí (tedy, že intenzita zrn s rostoucí vzdáleností velmi rychle klesá), již ve vzdálenosti 30 cm od povrchu předmětu nebyla pozorována žádná zrna, a bylo raději zvoleno pole vytvořené odrazem od drsného předmětu. Předmětem od něhož vznikala struktura koherenční zrnitosti, byl zvolen hliníkový kvádr s rozměry odrazné stěny přibližně 4,3 a 5 cm (Obr. 12), kterou bylo potřeba jemně zdrsnit křídovým práškem, jinak totiž byla stěna kvádrů na vznik koherenční zrnitosti moc hladká a nedocházelo k difúznímu odrazu.



Obr. 12. Laserový svazek dopadající v laboratoři na hliníkový předmět, a následně generující strukturu koherenční zrnitosti

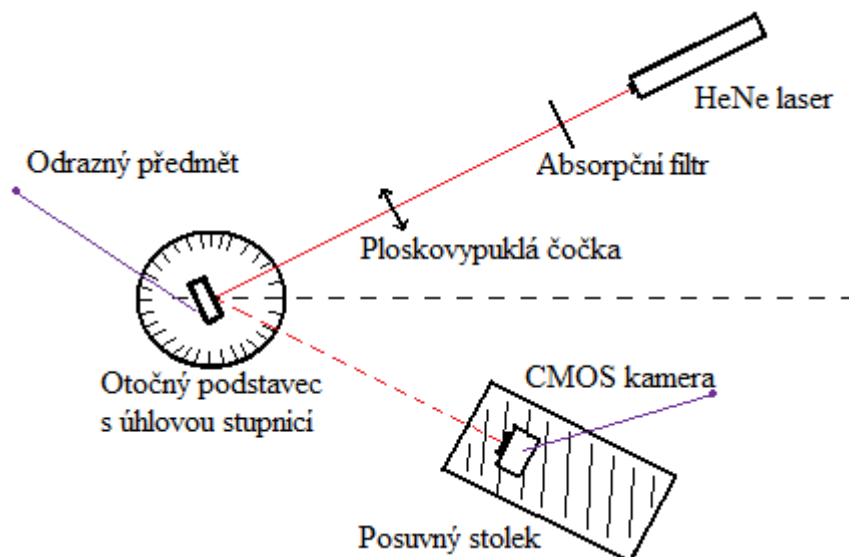
Odrazný kvádr byl umístěn na otočném stolku Standa 7R129 (schéma na Obr. 13), pomocí kterého bylo snadné přesně nastavit úhly dopadu a odrazu laserového svazku. K detekci pole koherenční zrnitosti byla použita monochromatická CMOS kamera EPIX Silicon Video® 9M001 s rozměry pixelů 5,2 μm x 5,2 μm . Tato kamera neobsahuje žádnou optickou čočku, takže detekuje objektivní pole koherenční zrnitosti. Byla uchycena na posuvném stolku Standa 7T175-100 s rozsahem posunutí 10 cm a nejmenším krokem 10 μm . Stolek samotný nebyl pevně přichycen k pracovní desce, ale jen ke kolejnici, po které s ním bylo možné na hrubo manipulovat.

Původně bylo zamýšleno použití stolku Physik Instrumente M-405, jenž se dá ve spojení s motorovou řídicí jednotkou Mercury C-862 ovládat pomocí počítačového softwaru, ale rozsah stolku 5 cm se ukázal jako nedostačující.

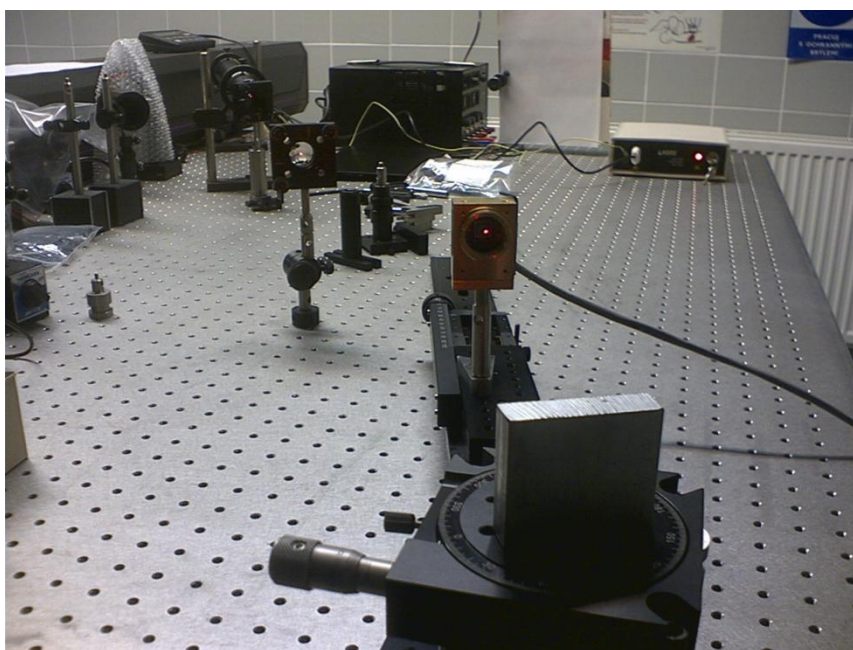
K ovládání kamery a ukládání snímků sloužil program XCAP-Ltd. Kvůli velké intenzitě detekovaného světla byl před laserem umístěn absorpční filtr Thorlabs NE10A s optickou hustotou 1,0. Dále také laserový paprsek ještě před dopadem na předmět procházel ploskovypuklou optickou čočkou Thorlabs LA1986-A-BK7 s ohniskovou vzdáleností 125 mm. Čočka byla do sestavy zařazena, protože při její absenci byla detekovaná zrna již ve vzdálenosti 20 cm velmi dlouhá. Čočka byla použita ke zvětšení světelné stopy laseru na předmětu a tedy ke zmenšení rozměrů zrn plynoucích ze vzorců (12) a (13). Bylo vyzkoušeno více čoček různých parametrů a s ohledem na pracovní podmínky byla vybrána právě čočka Thorlabs LA1986-A-BK7.

Prvním krokem ve snímání struktury koherenční zrnitosti bylo správně sestavit měřicí aparaturu a zajistit tak, aby laserový svazek putoval ve směru rovnoběžném s rovinou desky antivibračního stolu, aby procházel absorpčním filtrem, středem ploskovypuklé čočky a vytvořil na hliníkovém kvádru malou světelnou stopu.

Schematické uspořádání komponent a fotografie pořízená v laboratoři během měření jsou zobrazeny na Obr. 13 a Obr. 14.



Obr. 13. Schematické uspořádání komponent použité pro detekci pole koherenční zrnitosti; kolmo dopadající laserový svazek



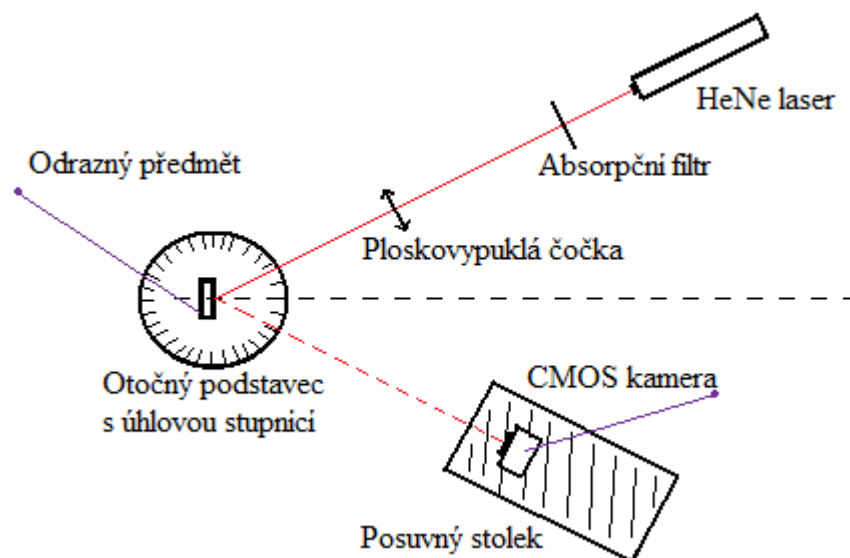
Obr. 14. Laboratorní uspořádání pro detekci struktury koherenční zrnitosti

Kvádr na otočném stolku byl umístěn tak, aby jeho čelní stěna splývala s osou rotace stolku a aby na tuto osu dopadal světelný paprsek. Při různém natočení stolku tedy laser pořád dopadal na stejné místo kvádru.

Struktura koherenční zrnitosti byla skenována při různých úhlech natočení odrazného předmětu vůči laseru i kameře. Nejdříve byl zvolen kolmo dopadající laserový svazek na

předmět (Obr. 13) a kamerou bylo pohybováno postupně pro úhly 10° , 15° resp. 20° vzhledem k normále odrazné plochy předmětu. Sestava byla uspořádána pomocí zrcátka, kterým se kvádr dočasně nahradil. Laser zůstal během měření nehybný. Úhel dopadu a odrazu laserového svazku byl pro různé případy nastaven na 5° , $7,5^\circ$ resp. 10° a kamera na kolejnici byla umístěna tak, aby po celé délce rozsahu jejího pohybu dopadal odražený paprsek do středu kamery. Takto bylo dosaženo mezi laserem a kamerou požadovaných (dvojnásobných) úhlů a již stačilo jen pootočit rotační stolek zpět na kolmý dopad laserového svazku. Další měření probíhala pod stejnými úhly odrazu i dopadu svazku (Obr. 15) a to opět 10° , 15° resp. 20° . Průběh jejich nastavení byl stejný jako v prvním případě, po zajištění odrazu světla do středu kamery však již nebylo zapotřebí další manipulace s otočným stolem.

Vzdálenost mezi laserem a místem dopadu světla na předmět byla náhodně nastavena na 120,3 cm. Absorpční filtr byl vložen 5 cm před laser. Střed čočky byl umístěn 61,5 cm od hliníkového kvádru tak, aby byla v rozsahu možného posunutí kamery vymezeným použitým posuvným stolem pozorována interferenční zrna, která se s měnící vzdáleností objevují a znovu mizí. S tímto ohledem byla také volena vzdálenost kamery od kvádru a to tak, aby se CCD matice kamery pohybovala ve vzdálenosti od 30 do 40 cm.



Obr. 15 Schematické uspořádání komponent použité pro detekci pole koherenční zrnitosti; laserový svazek dopadající na předmět pod nenulovým úhlem

2.2 Detekce pole koherenční zrnitosti

Snímání interferenčních obrazců probíhalo samozřejmě v laboratoři bez oken a při zhasnutém světle. I tak však bylo detekováno jisté rušivé záření, pocházející například ze zapnutého monitoru počítače. Prvním úkolem tedy bylo změřit tzv. šum pozadí odpovídající hodnotám při zacloněném laseru a nastavit ho jako nulovou hladinu.

Dále bylo třeba v programu XCAP vhodně nastavit hodnoty zesílení a expoziční doby tak, aby histogram detekované intenzity světla v živém obrazu koherenční zrnitosti odpovídal křivce rozložení intenzity v bodě jako na Obr. 4 a aby byl poměr signálu k šumu co nejbližší jedné.

Ačkoliv bylo možné zvolit krok mezi po sobě jdoucími snímky 10 μm , změny v obraze byly tak malé, že se zdálo být dostačující posouvat kameru dvěma plnými otáčkami posuvného šroubu, neboli zvolit krok jeden milimetr. Skenování prostoru tedy probíhalo následovně: Posuvný stolek byl na začátku nastaven na pozici 0 mm, odcloněná kamera zaznamenala na CCD čip ve vzdálenosti 30 cm od odrazného předmětu dopadající světlo a tento intenzitní snímek byl pod názvem snimek000.asc uložen v počítači. Následně bylo pootočeno šroubem o dvě otáčky na pozici 1 mm a snímek znovu uložen do souboru snimek001.asc. Číslo snímku je tedy zároveň možné chápat jako vzdálenost v mm, o kterou byl stolek posunut. Při přičtení hodnoty 30 cm k pozici posuvného stolku je získána vzdálenost od předmětu, na který dopadal laserový svazek. Pro každé z šesti různých uspořádání předmětu a kamery zmíněných dříve bylo při posunutí kamery o 10 cm zaznamenáno 101 snímků. Ačkoli má použitá kamera rozlišení 1024 x 1280 pixel, získané snímky byly jemně oříznuty a ukládány s 1024 řádky a 1260 sloupci čísel mezi 0 a 255 odpovídajícím rozložením detekované intenzity. Snímky byly ukládány do jednotlivých ascii souborů, ve kterých sloupce byly odděleny mezerami a řádky čárkami.

Všechna další práce se zruy v zaznamenaných strukturách koherenční zrnitosti poté probíhala v programu MATLAB.

Pro jednodušší označení pořízených snímků v textu je použita následující symbolika: první číslo udává úhel mezi normálou čelní plochy difúzně odrazného předmětu a rovinou, ve které se pohyboval střed kamery. Dopadal-li laserový svazek na předmět kolmo, je před číselným údajem ještě písmeno K. Za lomítkem následuje název souboru bez přípony, do kterého je snímek uložen. Pokud je snímek po prahování (s hodnotou prahu rovnou dvojnásobku střední intenzity), je k názvu přidáno písmeno T. A jedná-li se pouze o výřez ze

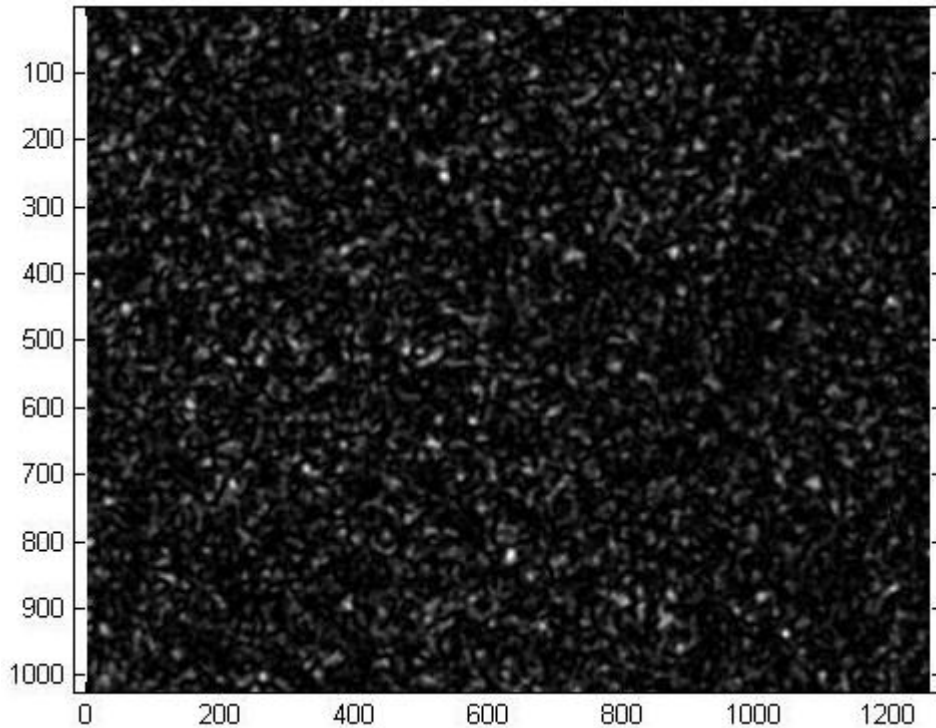
snímku, končí jeho označení, znovu za lomítkem, ještě rozsahem výřezu. Tedy např. kód 10/Snimek010T/400-800,650-1050 znamená, že se jedná o snímek pořízený při úhlu dopadu i odrazu laserového svazku 10° , ve vzdálenosti 31 cm od povrchu kvádru, na snímek bylo aplikováno prahování a jedná se o výřez s řádky 400-800 a sloupci 650-1050 z původního snímku.

První člen kódu je uváděn rovněž v tabulkách pro rozlišení uspořádání měření.

2.3 Zpracování dat a vykreslení zrn

Laboratorní uspořádání při detekci pole koherenční zrnitosti mělo několik variací, což však nemá žádný vliv na zpracování snímků v programu MATLAB. Jedná se totiž pořád o stejný úkol, a to vybrat v sérii 2D snímků struktur koherenční zrnitosti konkrétní zrno, všechny snímky poté za sebe seřadit do jedné 3D matice a generovat model zrna.

Úplně prvním krokem k vytvoření prostorových modelů zrn je importování sekvence snímků pořízených kamerou do programu MATLAB. Snímky s příponou asc načtené do pracovního prostředí programu jsou 2D matice o rozměrech 1024x1260, kde každá hodnota v matici odpovídá zaznamenané intenzitě světla na příslušném pixelu na čipu kamery (Obr. 16). Černobílý snímek je možné zobrazit příkazem „`imagesc`“ při paletě nastavené na „`colormap(gray)`“.

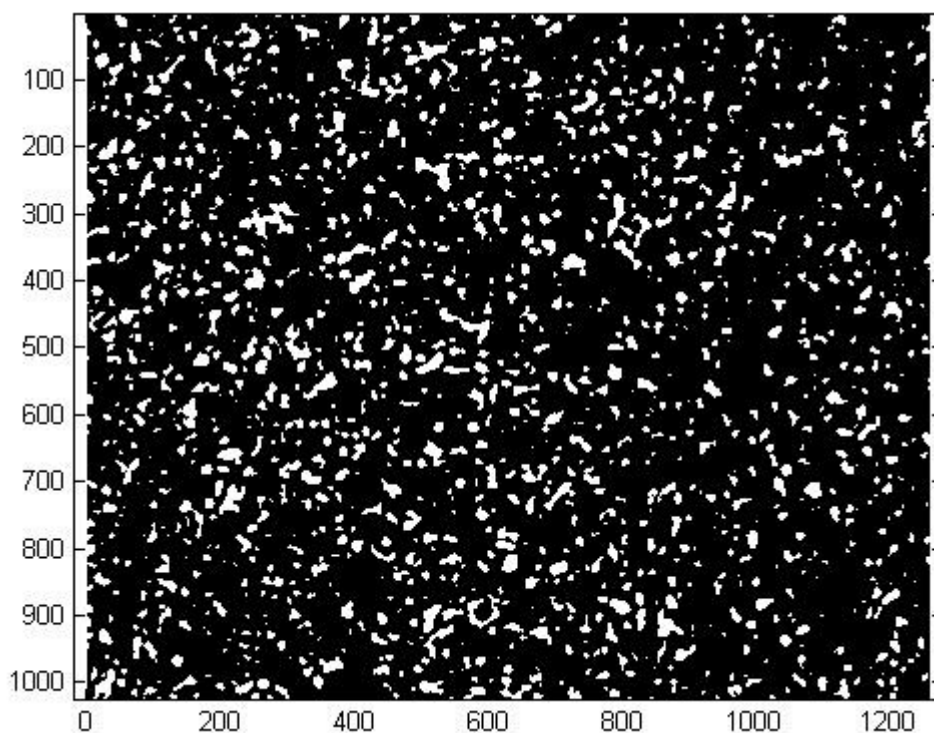


Obr. 16. Vykreslení snímku načteného do pracovního prostředí programu MATLAB ze souboru typu asc

Ze snímku na Obr. 14 bylo třeba odfiltrout šum a najít hranice jednotlivých zrn. Využitím matematické morfologie, pomocí Cannyho hranového detektoru, byly příkazem „edge(snimek,'canny')“ hledány hranice zrn. Jak je vidět na Obr. 6, nalezené křivky se neuzavíraly a vůbec neodpovídaly hranicím světlých ploch.

Naopak užitím prahování s prahem funkce rovným dvojnásobku střední intenzity snímku [13] (Obr. 17) byly získány snímky s jasně oddělenými světlými ploškami, nabývající hodnot 1 tam, kde byla intenzita rovna nebo větší než zvolený práh. Zbytkům snímků byly přiřazeny hodnoty 0.

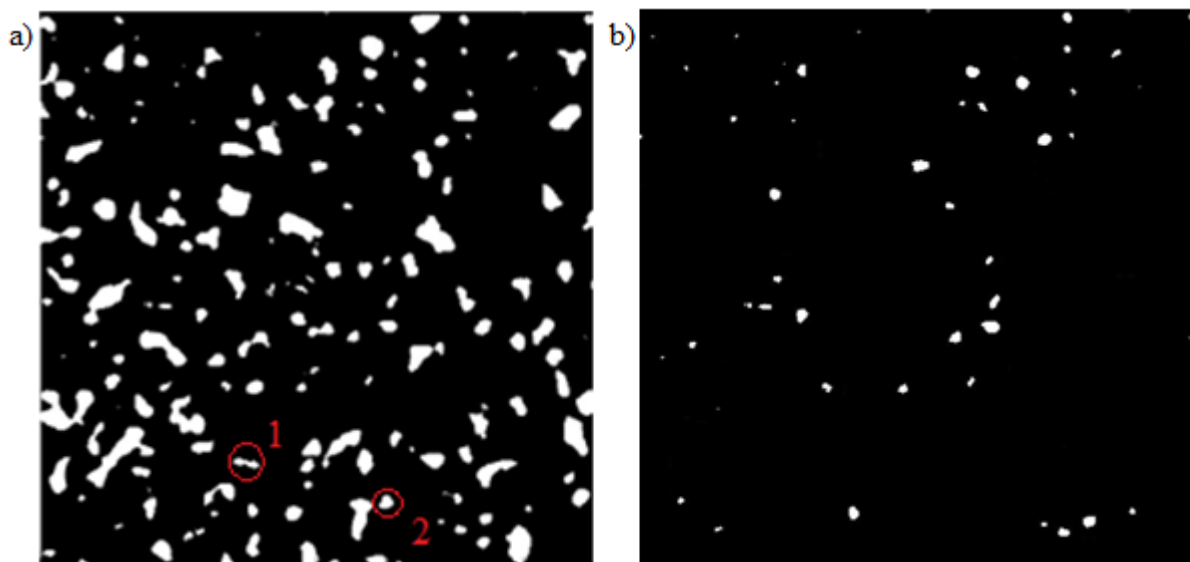
Každý snímek má jiné rozložení intenzity, jinou střední intenzitu. Ty byly v programu MATLAB získány pomocí příkazu „mean2“, který vypočítá střední hodnotu ze všech čísel v matici. Následovalo vynásobení dvěma a příkaz pro prahování „snimek>hodnota_prahu“.



Obr. 17. Výsledek prahování snímku s hodnotou prahu odpovídající dvojnásobku střední intenzity

Dále byly všechny intenzitní snímky po provedeném prahování převedeny do grafického formátu JPEG. V jejich sledu byla hledána zrna, která se během měření, tedy během sekvence sto jedna snímků, při vzdalování kamery od předmětu, objevovala ze tmy a ještě před jejím posunutím o 10 cm zase mizela.

Po prahování dvojnásobkem střední intenzity snímku byly světlé plochy na jednotlivých obrázcích jasně ohraničeny (Obr. 17). Ne vždy však tyto plochy měly tvar kruhu, či elipsy, jak plyne z teorie. Jako by nenáležely právě jednomu zrnu. Velmi často se světlé stopy jevíly spíše jako shluky více zrn, které se překrývaly a bylo těžké až nemožné v sekvenci snímků rozeznat, kde jedno zrno začíná a kde končí. Proto nebyly takovéto útvary brány v potaz (Obr. 18). Najít světlou plochu, která nepatří pouze jednomu zrnu, není těžké. I když může nejdříve vypadat jako jediné zrno, při jejím sledování v sekvenci snímků se mnohdy dělí na vícero menších, nebo naopak shlukuje s jinými do větších ploch anebo se pohybuje v jiném směru, než by měla.



Obr. 18. 10/Snimek050T/400-800,650-1050 a) s dvěma vyznačenými překrývajícími se zrn, b) bez překrývajících se zrn

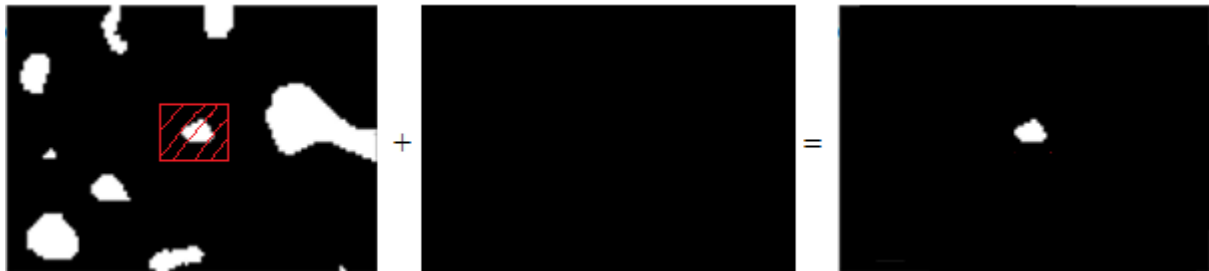
Není-li podélná osa zrna přesně rovnoběžná se směrem posunutí kamery, průřezy odpovídající jednomu zrně mají na různých snímcích různé pozice středů. Pro vizualizaci jednotlivých zrn je vhodné snímek oříznout a ponechat pouze oblast, ve které se zrně tzv. pohybuje, viz Obr. 19. To se dá provést výběrem stejných submatic ze všech snímků, který se v programu MATLAB definuje jako „snimek(a:b,c:d)“, kde interval a až b specifikuje sloupce submatice a c až d řádky.



Obr. 19. a) První (10/Snimek040T/193-274,411-525), b) prostřední (10/Snimek048T/193-274,411-525,) a c) poslední (10/Snimek056T/193-274,411-525,) snímek zrna

Do vytvořených submatic zasahují i jiná zrna, která je lépe odstranit a modelované zrně tak izolovat. To se dá provést opět prací se submaticemi. Nejdříve se příkazem „zeros(x,y)“, kde x je délka intervalu <a, b> a y délka intervalu <c, d>, vytvoří prázdné matice stejné velikosti, jako jsou dříve ořezané snímky. Z těchto ořezaných snímků jsou následně vybírány submatice obsahující pouze světlé pixely zrna a jsou vkládány na stejná místa do

připravených nulových matic, viz Obr. 20. Příslušný příkaz pro zkopírování průřezu zrna do připravené nulové matice je „nulová_matice(k:l,m:n)=snimek(k:l,m:n)“.



Obr. 20. Izolování zrna ve snímku 10/Snimek048T/193-274,411-525

Posledními kroky jsou složení upravených 2D matic do jediné, prostorové, a její vykreslení. Nejdříve je nutné znovu vytvořit matici obsahující výhradně nuly, tentokrátě však prostorovou, příkazem „zeros(x,y,n)“, kde délka třetího rozměru n je rovna počtu plošných matic, které budou za sebe skládány. Upravené 2D snímky jsou vkládány postupně do 3D matice pomocí příkazů tvaru „prostorová_matice(:, :, i)=snimeki“. Závěrečné vygenerování zrna je vhodné provést příkazem „patch“.

Střední délka zrn se vztahuje ke kolmému průmětu na osu, po které se šíří struktura koherenční zrnitosti. Avšak za předpokladu, že je detekováno pole koherenční zrnitosti vždy pouze pod jedním úhlem (což je možné, protože rozměry CCD čipu jsou malé v porovnání se vzdáleností od předmětu a čip je tudíž pozorován pod malým úhlem), není třeba délky nalezených zrn přepočítávat, jelikož je pod tím úhlem měřena i vzdálenost od předmětu.

Není ani nutné vytvářet modely všech nalezených zrn. Ke zjištění délky jednotlivých zrn totiž stačí nalézt první a poslední snímek, na kterém se dané zrno vyskytuje. Pokud se např. zrnko poprvé objeví na snímku s označením 036 a naposledy na 068, je jeho délka stanovena na 32 mm.

I když osa zrna přesně neleží ve směru pozorování a tudíž je pozorováno pod úhlem odlišným od úhlu, který přísluší směru pozorování, na velikost zrna to nemá téměř žádný vliv. Délka zrna je řádově stokrát větší než jeho příčné rozměry i než kolmo promítnutá vzdálenost začátku a konce zrna na čip kamery, takže vzhledem ke kroku posunutí kamery 1 mm je tento mimosový aspekt zrna zanedbatelný.

K získání střední hodnoty délky zrn stačí zjistit délky souboru zrn a ty následně zprůměrovat. Tento soubor by se měl skládat pouze ze zrn, jejichž středy leží ve stejné vzdálenosti na ose šíření koherenční zrnitosti. Jelikož takových zrn bylo nalezeno velmi málo, je délka počítána ze všech zrn objevujících se v rovině vzdálené 35 cm od předmětu.

Při stanovování středního příčného rozměru zrn jsou plochy průřezů zrn přepočítávány na kruhové a z nich následně určovány průměry kruhů. I když pozorované průřezy zrn opět nejsou pořizovány v rovinách kolmých k osám zrn, na obsah průřezu to má zanedbatelný vliv.

Obsahy všech světlých ploch (v pixel^2) v jednotlivých prahovaných snímcích byly určovány v programu MATLAB příkazem „sum“, kterým byly sečteny číslice (0 a 1) v řádcích a sloupcích matice.

3 Výsledky a diskuze

3.1 Teoretické hodnoty

3.1.1 Stopa laseru na předmětu

Velikost a tvar laserem osvětlené plochy na předmětu, od kterého se odrazem vytváří struktura koherenční zrnitosti, se dá vypočíst podle návodu v kapitole 1.2.2.2.

Ze vzorců (14), (15), (16), (17), (18) a (19), kde poloměr průřezu laserového svazku W_0 udaný výrobcem je 1 mm a ohnisková vzdálenost použité čočky $f=125$ mm, plyne, že průměr kolmo dopadajícího kruhového svazku D na hliníkový kvádr je přibližně 4,15 mm.

Pro úhly dopadu 10° , 15° resp. 20° má laserovým svazkem osvětlená plocha na povrchu předmětu tvar elipsy, jejíž vedlejší osa zůstává dlouhá 4,15 mm a hlavní poloosa nabývá podle vztahu (20) délek 4,21 mm, 4,29 mm, resp. 4,41 mm.

3.1.2 Střední velikosti zrn

Střední rozměry zrn jsou určeny vztahy (12) pro střední příčnou velikost zrna a (13) pro střední podélnou velikost zrna. Jediný neznámý parametr, jenž se v nich objevuje, průměr laserem osvětlené plochy předmětu, byl určen v předchozí kapitole 3.1.1.

Pro vzdálenosti 30 cm, 35 cm resp. 40 cm od povrchu předmětu, při jeho osvětlení kruhovou stopou, jsou vypočtené teoretické střední velikosti zrn shrnuty v tabulce Tab. 1.

Tab. 1. Střední rozměry interferenčních zrn ve vzdálenostech 30 cm, 35 cm resp. 40 cm od odrazného předmětu osvětleného laserovým svazkem vytvářejícím na povrchu předmětu kruhovou stopu

Vzdálenost od předmětu [cm]	30	35	40
Střední délka zrna [mm]	13,25	18,04	23,56
Střední průřez zrna [μm]	45,79	53,42	61,05

Dopadá-li laserový svazek kruhového průřezu na odrazný předmět pod úhlem, bude mít světelná stopa tvar elipsy s hlavní poloosou danou vztahem (20). Pro případy, kdy laserový svazek dopadá na hliníkový předmět pod úhly 10° , 15° resp. 20° , jsou střední příčné rozměry zrna ve vertikálním směru zúžené, viz Tab. 2.

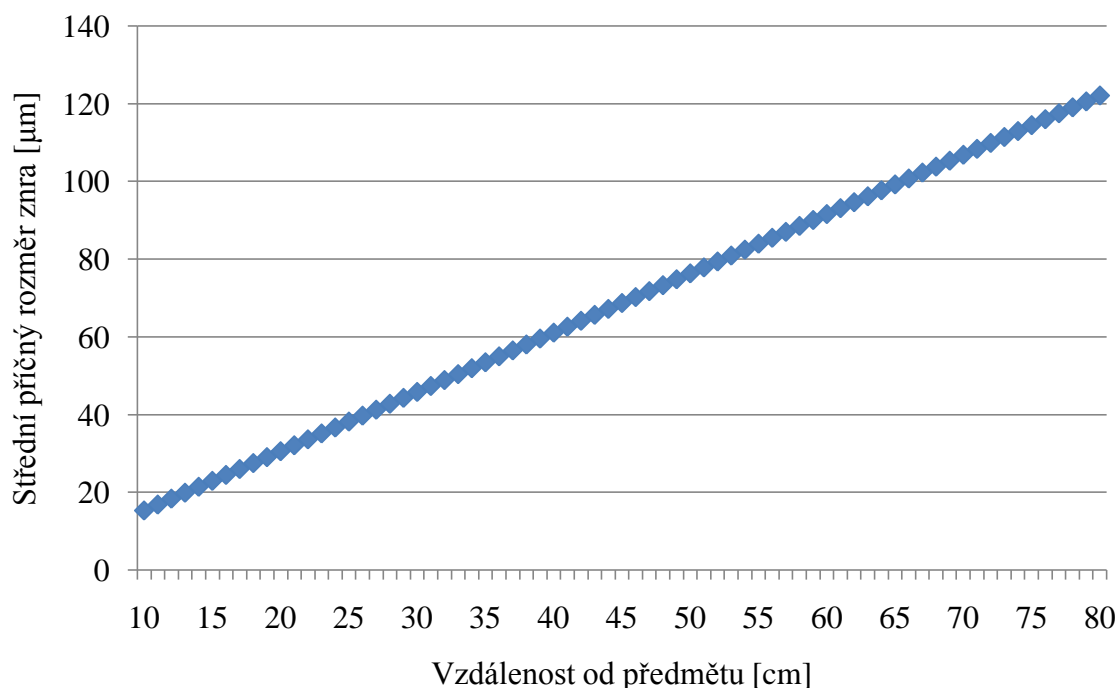
Tab. 2. Střední rozměry poloos eliptického průřezu zrna při dopadu laserového svazku na odrazný povrch předmětu pod úhly 10°, 15° resp. 20° ve vzdálenostech 30, 35 a 40 cm od odrazného povrchu předmětu

Vzdálenost od předmětu [cm]	30			35			40		
Úhel dopadu [°]	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Délka hlavní poloosy [μm]	45,8	45,8	45,8	53,4	53,4	53,5	61,1	61,1	61,1
Délka vedlejší poloosy [μm]	45,1	44,2	43	52,6	51,6	50,2	60,1	59,0	57,4
Rozdíl délek poloos [μm]	0,70	1,56	2,76	0,81	1,82	3,22	0,93	2,08	3,68

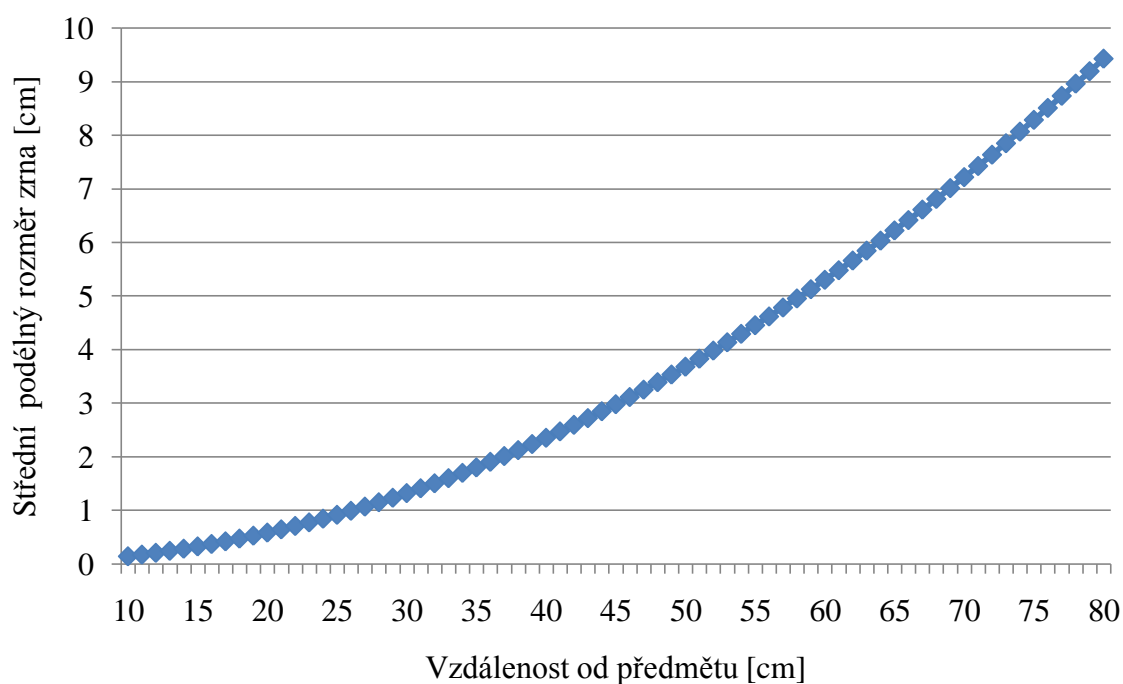
Rozdíly středních délek poloos jsou v uvažovaném intervalu vzdáleností mezi 30 cm a 40 cm od odrazného předmětu menší, než je rozteč pixelů ($5,2 \mu\text{m} \times 5,2 \mu\text{m}$) na CCD čipu použité kamery, kolmé průřezy zrn by se tedy měly velmi podobat kruhům.

Závislosti středních velikostí zrn na vzdálenosti od předmětu jsou vykresleny v grafech Graf 1 a Graf 2.

Graf 1. Závislost velikosti středního průměru zrn na vzdálenosti od odrazného předmětu



Graf 2. Závislost střední délky zrn na vzdálenosti od odrazného předmětu

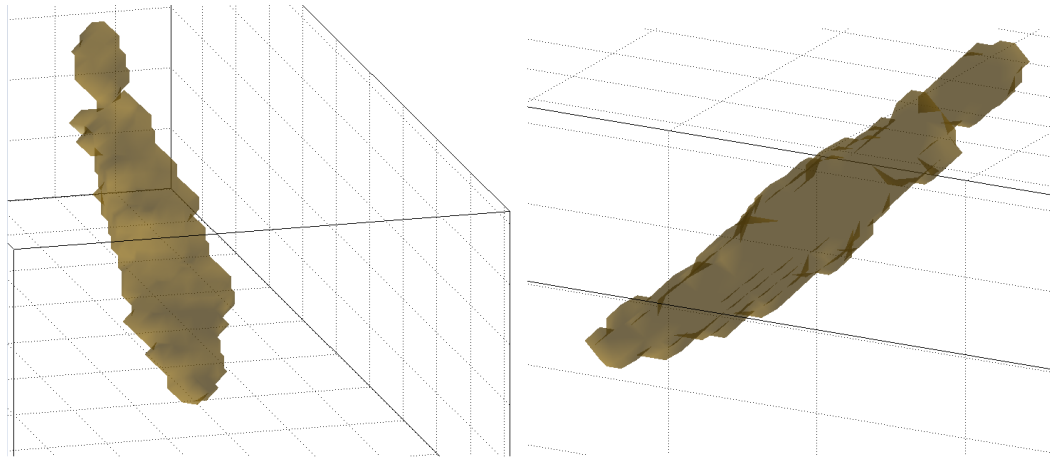


3.2 Experimentální hodnoty

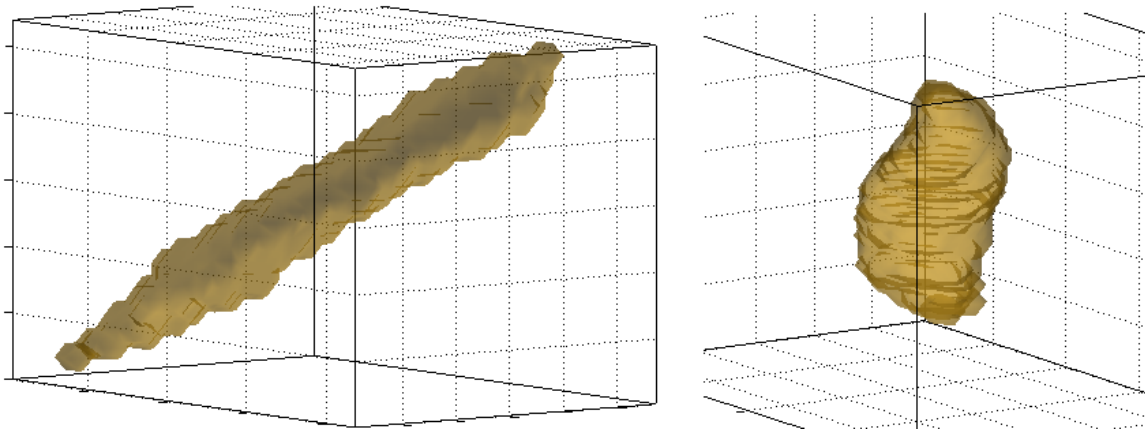
Pole koherenční zrnitosti bylo skenováno s ohledem na velikost zrn v rozsahu 10 cm s krokem 1 mm ve vzdálenosti od 30 cm do 40 cm od povrchu odrazného předmětu, a to dvakrát pro každý ze tří různých úhlů 10° , 15° resp. 20° mezi normálou čelní plochy předmětu a kamerou. Poprvé při nulovém úhlu dopadu laserového svazku na předmět a podruhé při stejných úhlech dopadu a odrazu svazku.

Aby bylo na snímcích co nejvíce zrn, která se ze tmy objevují a do tmy znovu mizí, byla hledána zrna, jejichž průřez je zaznamenán uprostřed 10 cm intervalu, tedy ve vzdálenosti 35 cm povrchu předmětu. Některá taková zrna jsou vykreslena na Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23 a také v Příloze 1. Hodnoty na osách souřadnicových systémů uvedených obrázků nejsou ve stejných jednotkách. Zatímco ve směru šíření zrn odpovídá jednotka 1 mm, v dalších směrech odpovídá $1 \mu\text{m}$. Pro jednodušší hledání mizejících zrn byly všechny snímky v rozlišení 1024×1260 pixelů oříznuty na menší oblasti. Byly vybrány ořezané snímky v rozlišení 401×401 pixelů při výběrech 200-600, 201-601 pixelů a 400-800, 650-1050 pixelů.

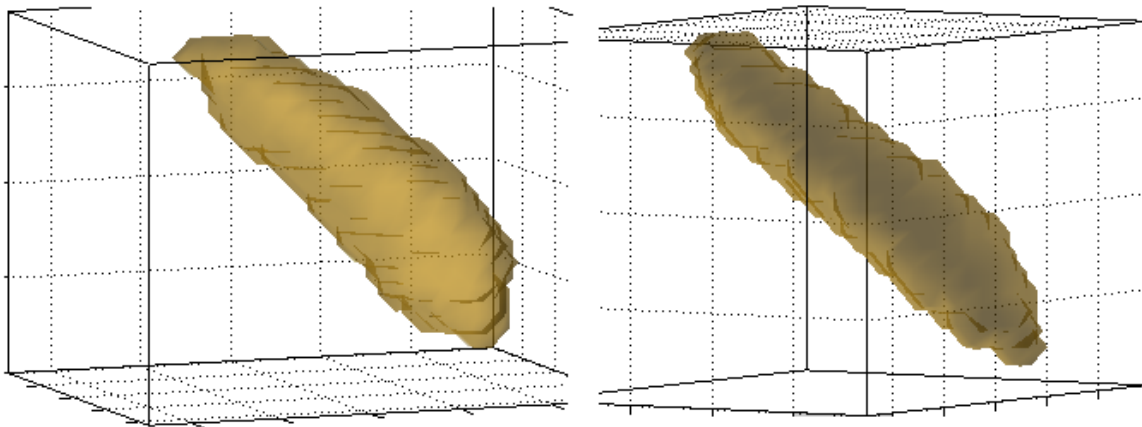
Útvary, jež se jevily jako složené z více zrn, byly ignorovány. Modelované příklady takovýchto překrývajících se zrn jsou na Obr. 24 a Obr. 25.



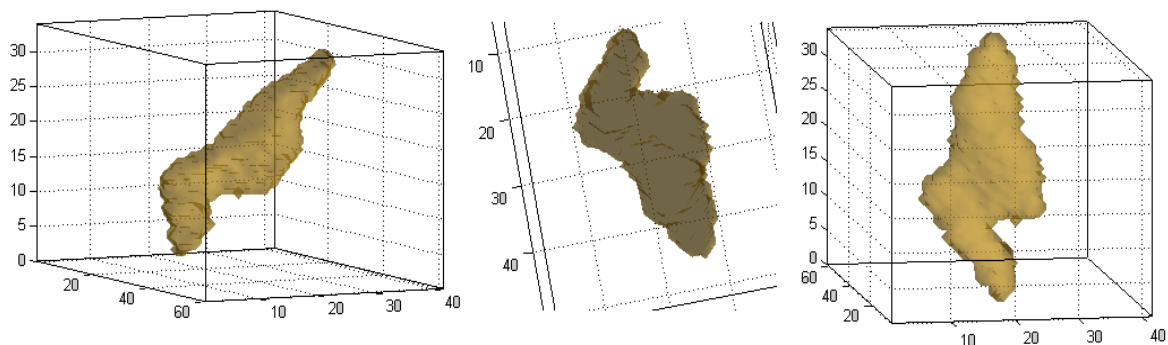
Obr. 21. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 10° na povrch předmětu



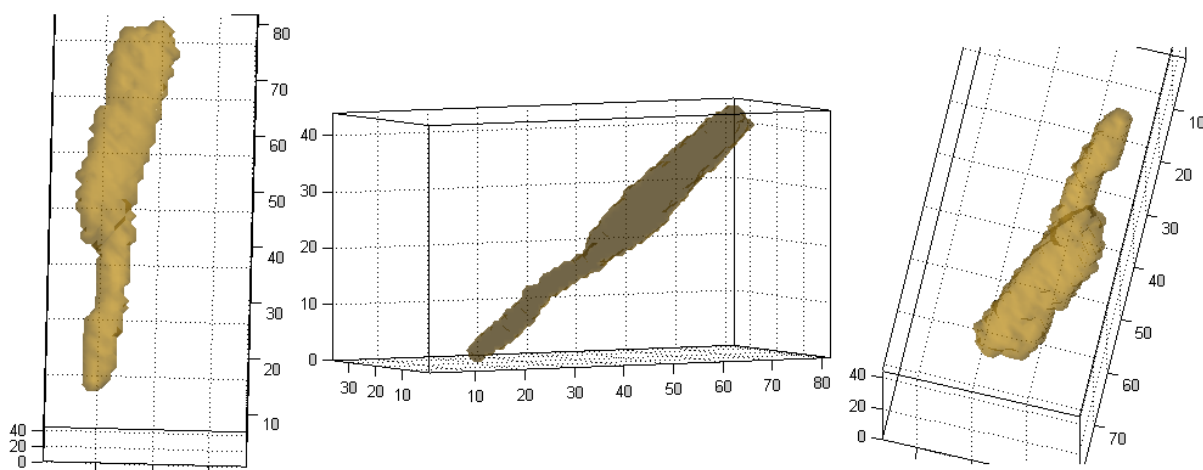
Obr. 22. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 15° na povrch předmětu



Obr. 23. Zrno při dopadu laserového svazku pod úhlem 20° na povrch předmětu



Obr. 24. Model dvou dotýkajících se zrn z Obr. 21 a) 1



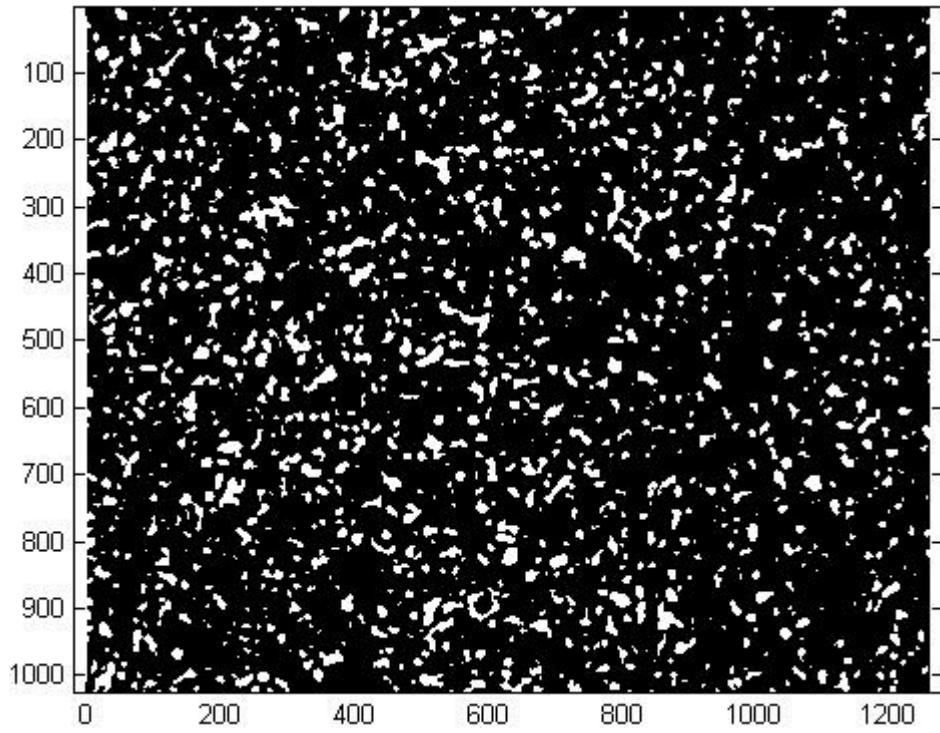
Obr. 25. Model dvou dotýkajících se zrn z Obr. 21 a) 2

3.2.1 Laserový svazek dopadající na odrazný předmět pod úhly 10°, 15° a 20°

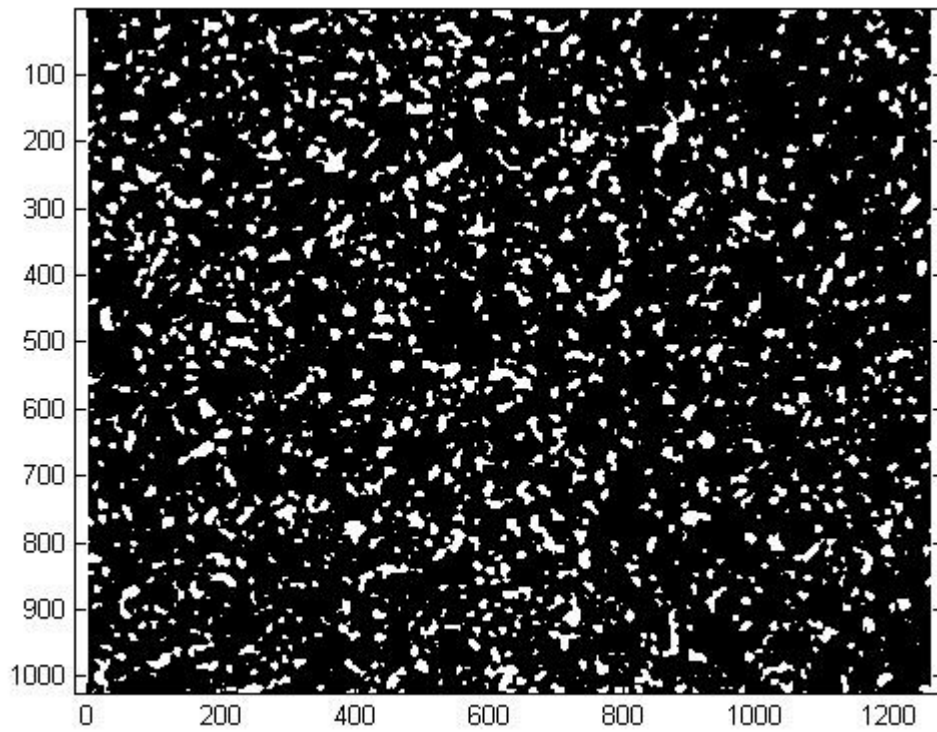
Po prahování sekvencí snímků dvojnásobkem střední intenzity (Tab. 3) jednotlivých snímků byly získány obrázky se zřetelně ohraničenými zrn (viz Obr. 26, Obr. 27 a Obr. 28).

Tab. 3. S rostoucí vzdáleností od předmětu klesající tendence střední intenzity snímku

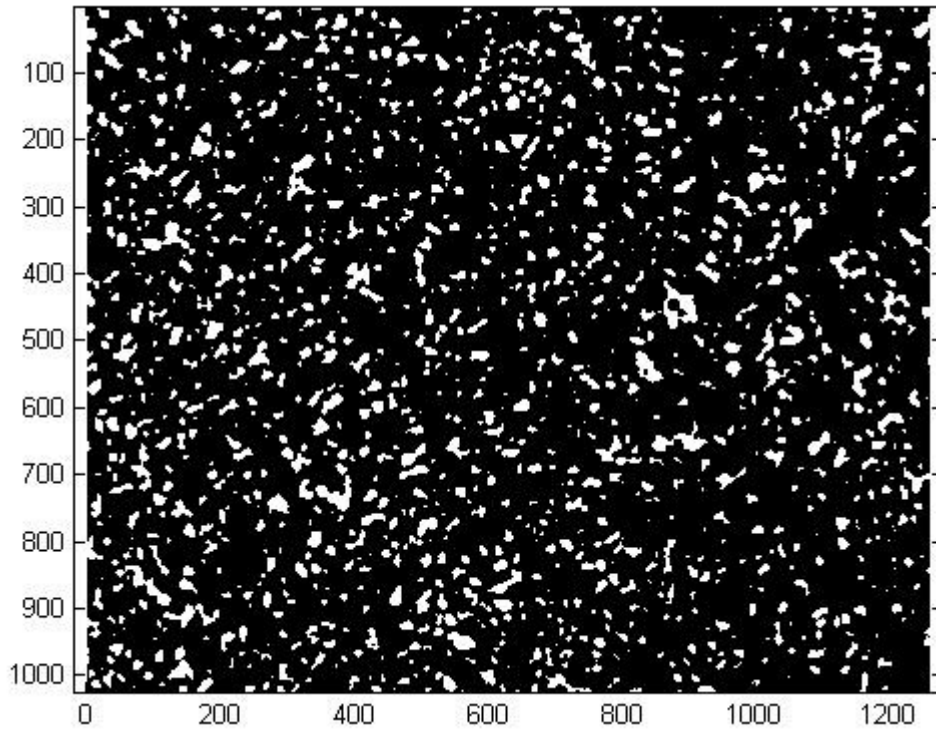
Uspořádání [°]	10	15	20
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 30 cm od předmětu [-]	50,82	61,31	61,17
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 35 cm od předmětu [-]	37,23	46,57	45,38
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 40 cm od předmětu [-]	28,57	35,81	35,05



Obr. 26. Snímek 10/Snimek050T

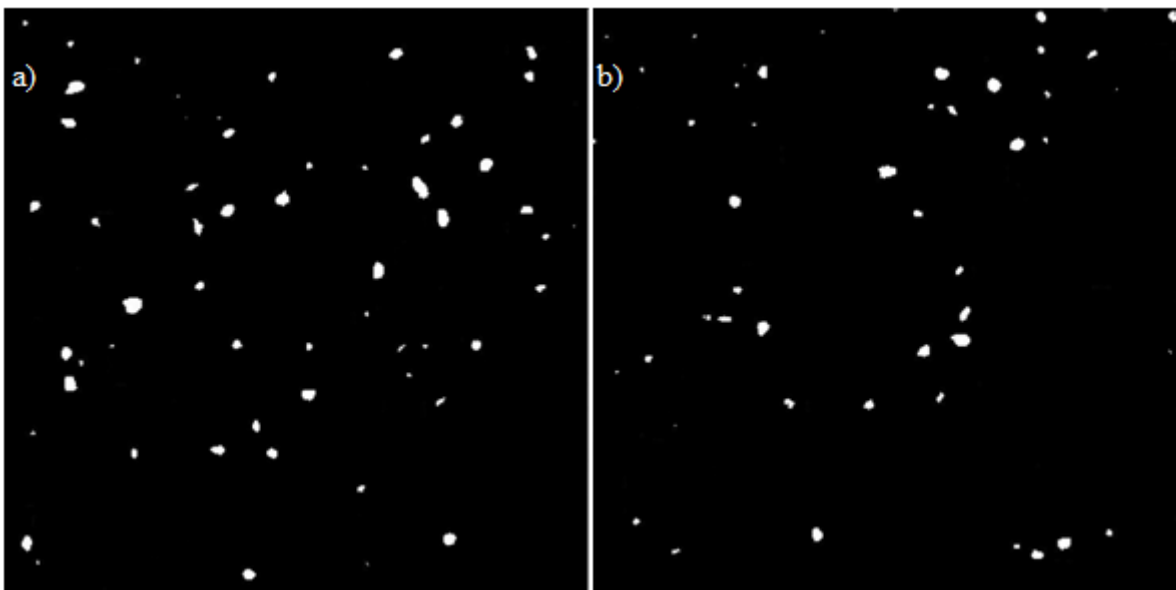


Obr. 27. Snímek 15/Snimek050T

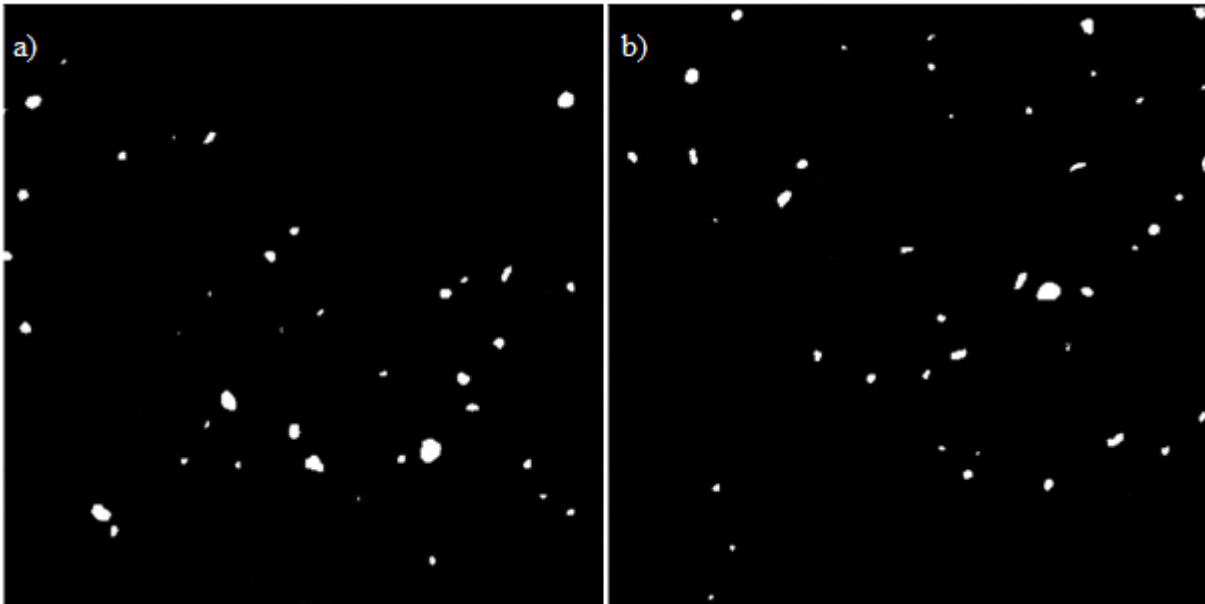


Obr. 28. Snímek 20/Snimek050T

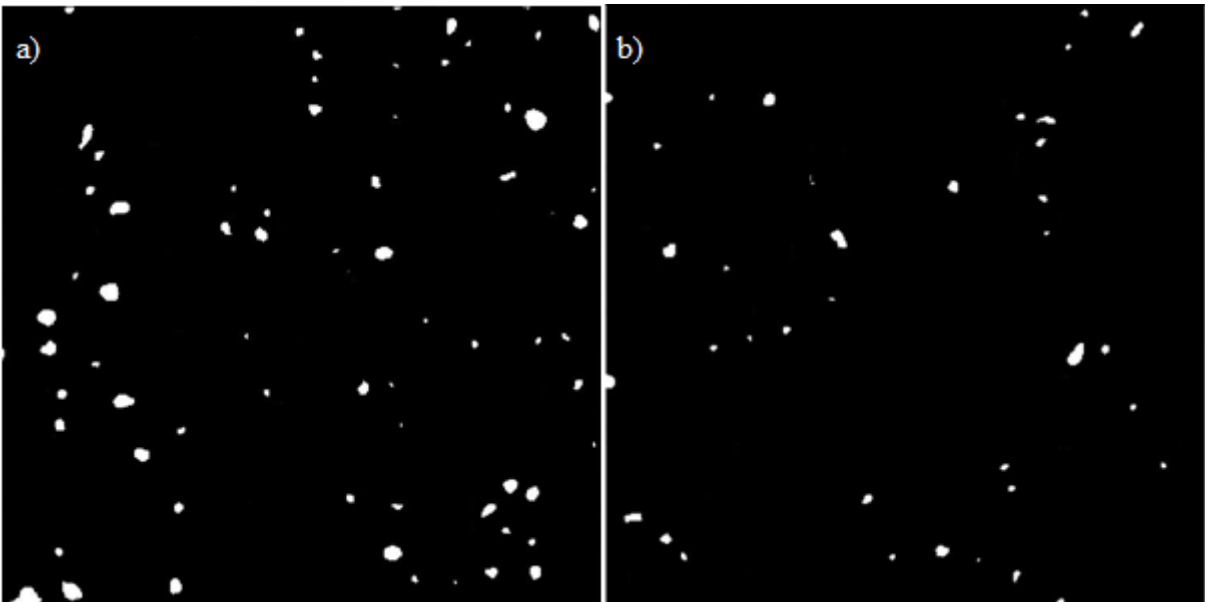
Výřezy snímků ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu zbavené překrývajících se zrn, jsou na Obr. 29, Obr. 30 resp. Obr. 31. Světlé plochy na uvedených snímcích odpovídají zrnům, jež procházejí rovinou vzdálenou 35 cm od hliníkového kvádrů a bylo u nich možné určit první a poslední snímky, na kterých se objevují.



Obr. 29. Ve snímcích a) 10/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 10/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice



Obr. 30. Ve snímcích a) 15/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 15/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice



Obr. 31. Ve snímcích a) 20/Snimek050T/200-600,201-601 a b) 20/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice

3.2.1.1 Střední rozměry zrn

V prvním případě, kdy laserový svazek dopadal pod úhlem 10° na difúzně odrazný povrch hliníkového kvádru, bylo ve snímcích struktury koherenční zrnitosti, z 372 světlých plošek o celkovém obsahu 41 829 pixel², izolováno 106 zrn koherenční zrnitosti. Jejich

podélné rozměry jsou vypočteny v tabulce Tab. 4 a příčné velikosti jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tab. 4. Délky vybraných zrn ve snímku 10/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	46	44	36	49	33	30	42	44	40	47	41	42	50	45	46	48	44	26	46
K	52	53	76	97	50	52	64	55	56	65	55	69	76	63	62	69	57	59	81
R	6	9	40	48	17	22	22	11	16	18	14	27	26	18	16	21	13	33	35

P	48	31	42	39	31	48	50	44	38	22	24	46	35	40	42	38	38	47	41
K	53	53	58	60	61	60	72	52	53	58	62	57	63	55	53	56	58	53	65
R	5	22	16	21	30	12	22	8	15	36	38	11	28	15	11	18	20	6	24

P	34	42	47	49	46	49	50	36	47	33	38	24	46	50	45	46	34	33	48
K	59	52	52	56	53	52	53	54	60	58	54	51	63	58	77	51	56	51	50
R	25	10	5	7	7	3	3	18	13	25	16	27	17	8	32	5	22	18	2

P	44	50	50	44	41	50	43	42	48	50	45	31	42	41	47	31	35	47	43
K	66	67	96	53	56	52	54	52	66	55	71	50	52	50	58	51	60	60	87
R	22	17	46	9	15	2	11	10	18	5	26	19	10	9	11	20	25	13	44

P	49	49	37	42	36	48	31	44	28	45	42	50	27	34	45	43	43	43	46
K	62	67	51	63	81	57	51	68	67	61	57	58	52	63	54	52	76	52	57
R	13	18	14	21	45	9	20	24	39	16	15	8	25	29	9	9	33	9	11

P	38	36	41	48	34	48	40	46	46	48	44
K	77	71	59	67	50	89	57	68	75	61	70
R	39	35	18	19	16	41	17	22	29	13	26

Tab. 5. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 10/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	7	11	8	82	50	20	35	109	5	9	49	73	23	5	5	54	4	47	2
P	16	19	17	53	41	26	35	61	13	18	41	50	28	13	13	43	12	40	8

O	1	33	8	15	19	64	58	43	68	26	7	10	18	30	5	57	32	46	37
P	6	34	17	23	26	47	45	38	48	30	16	19	25	32	13	44	33	40	36

O	15	2	46	59	7	18	36	37	79	100	64	22	46	42	33	14	37	24	2
P	23	8	40	45	16	25	35	36	52	59	47	28	40	38	34	22	36	29	8

O	3	2	1	4	5	41	4	15	12	51	19	9	58	25	3	16	27	2	15
P	10	8	6	12	13	38	12	23	20	42	26	18	45	29	10	23	30	8	23

O	51	10	12	39	59	21	31	50	84	43	21	20	80	9	10	22	64	12	61
P	42	19	20	37	45	27	33	41	54	38	27	26	52	18	19	28	47	20	46

O	67	17	37	21	25	22	49	12	2	1	1
P	48	24	36	27	29	28	41	20	8	6	6

Průměrná délka zrn procházejících rovinou vzdálenou 35 cm od odrazného předmětu při úhlu dopadu laseru 10° je 18,93 mm, jejich střední šířka v této rovině je 31,85 μm . Středů těchto zrn se nacházejí průměrně ve vzdálenosti 35,11 cm.

Při dopadu laserového svazku pod úhlem 15° na odrazný předmět bylo (Obr. 30) pozorováno 364 světlých ploch o obsahu 44 210 pixel² a v nich 81 zrn koherenční zrnitosti. Jejich délky resp. šířky jsou uvedeny v tabulce Tab. 6 resp. tabulce Tab. 7.

Tab. 6. Délky vybraných zrn ve snímku 15/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	48	43	46	35	48	37	23	34	35	43	46	42	27	50	48	31	36	49	45
K	51	52	66	65	62	52	76	54	54	53	58	58	57	64	77	53	54	57	74
R	3	9	20	30	14	15	53	20	19	10	12	16	30	14	29	22	18	8	29

P	45	49	48	42	49	37	44	48	44	40	37	35	42	44	33	48	42	33	39
K	57	54	56	53	51	57	55	62	67	50	50	55	50	51	60	64	52	56	81
R	12	5	8	11	2	20	11	14	23	10	13	20	8	7	27	16	10	23	42

P	11	25	26	32	48	48	49	37	44	47	45	44	43	53	47	49	22	11	37
K	85	64	53	61	50	54	58	55	53	52	57	56	54	61	73	57	52	70	55
R	74	39	27	29	2	6	9	18	9	5	12	12	11	8	26	8	30	59	18

P	41	41	48	50	41	33	47	43	45	40	45	42	48	40	47	37	43	47	41
K	60	60	53	52	56	54	53	72	51	54	57	56	57	51	70	54	62	57	51
R	19	19	5	2	15	21	6	29	6	14	12	14	9	11	23	17	19	10	10

P	47	50	33	49	47
K	60	61	53	53	74
R	13	11	20	4	27

Tab. 7. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 15/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	6	11	72	2	34	25	39	36	4	42	11	99	11	15	28	101	18	2	23
P	14	19	50	8	34	29	37	35	12	38	19	58	19	23	31	59	25	8	28

O	96	23	170	61	11	32	51	3	10	36	13	39	41	24	39	8	49	90	29
P	57	28	77	46	19	33	42	10	19	35	21	37	38	29	37	17	41	56	32

O	24	10	18	25	40	5	74	32	33	37	6	65	25	154	19	11	6	3	43
P	29	19	25	29	37	13	50	33	34	36	14	47	29	73	26	19	14	10	38

O	9	29	34	8	53	57	20	26	20	38	141	52	4	27	30	7	14	8	63
P	18	32	34	17	43	44	26	30	26	36	70	42	12	30	32	16	22	17	47

O	66	10	12	57	15
P	48	19	20	44	23

Průměrná délka zrn objevujících se na snímcích ve vzdálenosti 35 cm od odrazného předmětu pro úhel dopadu laseru 15° je 17,17 mm a jejich šířka je 34,71 μm. Středů těchto zrn se nacházejí průměrně ve vzdálenosti 34,97 cm.

Na Obr. 31, vytvořeném při svazku dopadajícím na předmět pod úhlem 20°, bylo pozorováno 356 světlých ploch o celkovém obsahu 39 177 pixel². Z těchto ploch jich 107 odpovídalo zrnům koherenční zrnitosti, jejichž délky jsou uvedeny v Tab. 8 a velikosti průřezů v Tab. 9.

Tab. 8. Délky vybraných zrn ve snímku 20/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	46	38	30	26	43	14	43	31	47	42	50	39	47	44	42	50	50	26	32
K	61	57	61	62	57	50	68	90	54	57	97	52	57	58	58	56	53	51	59
R	15	19	31	36	14	36	25	59	7	15	47	13	10	14	16	6	3	25	27

P	50	42	39	48	49	49	48	41	37	39	36	14	35	29	39	42	25	31	37
K	62	65	51	65	55	57	71	53	50	56	50	62	61	73	53	50	67	50	51
R	12	23	12	17	6	8	23	12	13	17	14	48	26	44	14	8	42	19	14

P	33	48	38	44	45	16	37	22	43	44	40	45	42	41	49	27	49	35	42
K	73	59	68	51	51	57	95	56	86	64	60	73	56	66	54	51	55	59	68
R	40	11	30	7	6	41	58	34	43	20	20	28	14	25	5	24	6	24	26

P	35	32	45	44	47	44	46	43	38	40	49	36	44	45	44	30	39	38	49
K	64	69	58	72	56	61	55	64	70	72	55	61	55	80	56	59	51	77	69
R	29	37	13	28	9	17	9	21	32	32	6	25	11	35	12	29	12	39	20

P	47	35	39	47	33	48	45	18	48	23	41	45	49	39	40	47	28	34	44
K	73	50	54	64	55	51	52	57	70	61	52	52	54	51	61	58	69	50	93
R	26	15	15	17	22	3	7	39	22	38	11	7	5	12	21	11	41	16	49

P	43	49	27	31	48	46	29	44	41	43	48	24
K	52	65	59	52	60	64	50	59	56	57	54	73
R	9	16	32	21	12	18	21	15	15	14	6	49

Tab. 9. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku 20/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	37	27	77	24	92	40	11	13	113	13	73	103	31	94	17	72	40	32	19
P	36	30	51	29	56	37	19	21	62	21	50	60	33	57	24	50	37	33	26
O	117	67	5	12	95	24	19	3	4	11	45	6	6	17	1	6	80	16	40
P	63	48	13	20	57	29	26	10	12	19	39	14	14	24	6	14	52	23	37
O	55	3	5	11	16	46	9	25	58	21	40	53	13	17	51	62	64	5	29
P	44	10	13	19	23	40	18	29	45	27	37	43	21	24	42	46	47	13	32
O	10	16	2	62	5	39	20	150	2	60	14	76	11	42	53	13	4	60	73
P	19	23	8	46	13	37	26	72	8	45	22	51	19	38	43	21	12	45	50
O	3	30	6	8	14	19	78	52	35	15	31	25	3	13	48	13	17	28	5
P	10	32	14	17	22	26	52	42	35	23	33	29	10	21	41	21	24	31	13
O	104	17	40	24	17	36	10	9	13	24	45	15							
P	60	24	37	29	24	35	19	18	21	29	39	23							

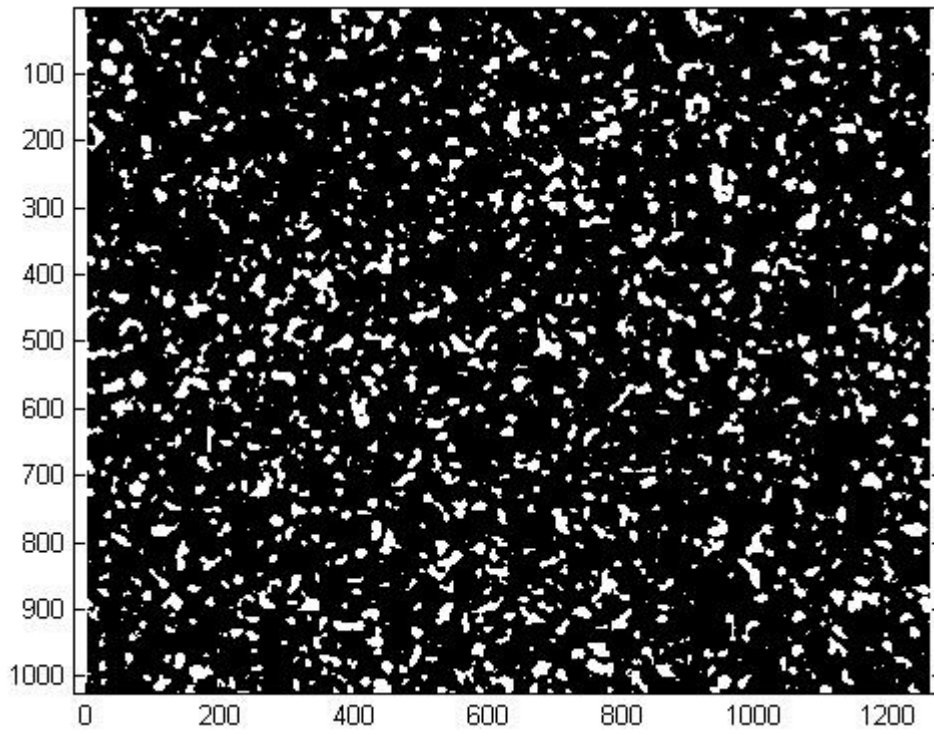
Průměrná délka zrn nalézajících se ve vzdálenosti 35 cm od odrazného předmětu pro úhel dopadu laseru 20° je 21,24 mm, střední průměr těchto zrn je 34,01 μm , a jejich středy se nacházejí průměrně ve vzdálenosti 35,01 cm.

3.2.2 Laserový svazek dopadající kolmo na odrazný předmět

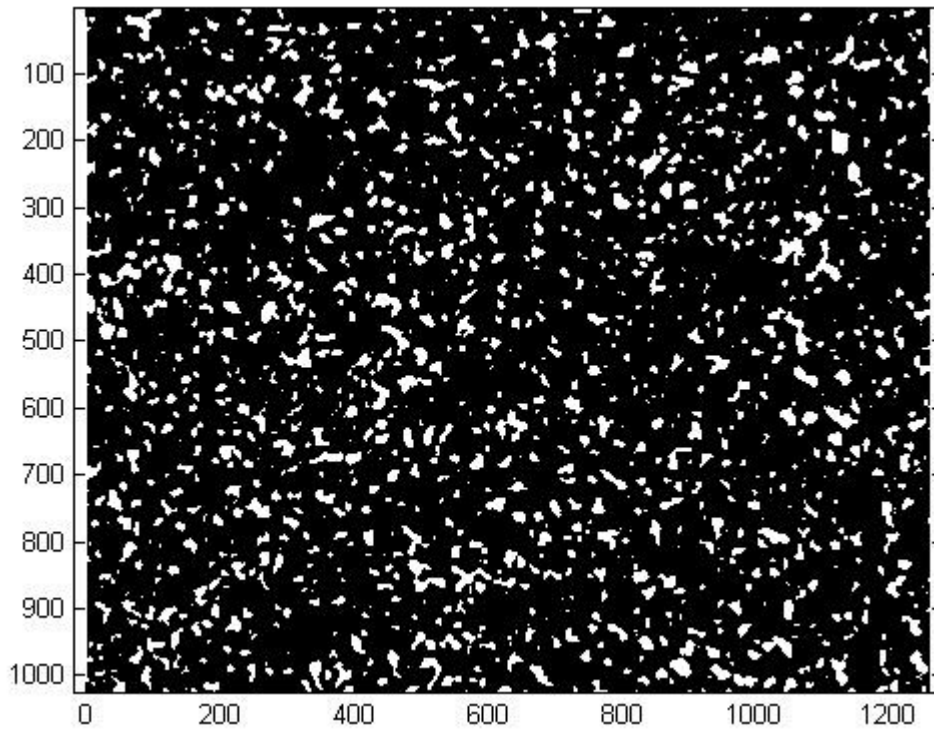
Po prahování sekvencí snímků dvojnásobkem střední intenzity (Tab. 10) jednotlivých snímků byly získány obrázky se zřetelně ohraničenými zrny (Obr. 32, Obr. 33 a Obr. 34).

Tab. 10. S rostoucí vzdáleností od předmětu klesající tendence střední intenzity snímku

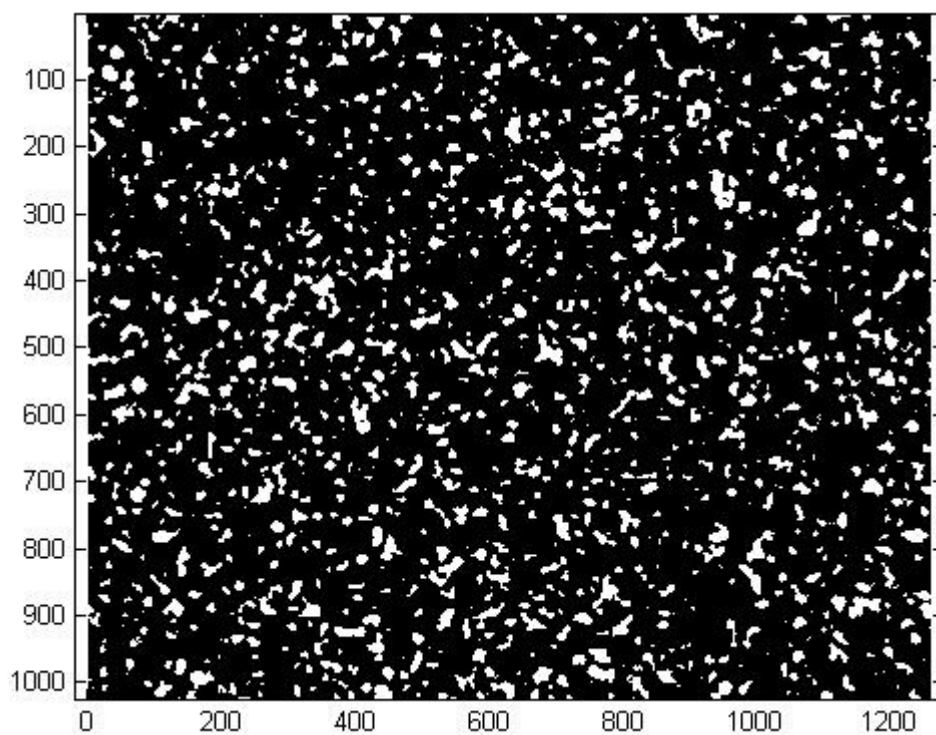
Uspořádání (K=kolmo) [$^\circ$]	K10	K15	K20
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 30 cm od předmětu [-]	52,85	42,73	20,05
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 35 cm od předmětu [-]	38,96	31,24	14,49
Dvojnásobek střední intenzity ve vzdálenosti 40 cm od předmětu [-]	29,49	23,77	10,86



Obr. 32. Snímek K10/Snimek050T

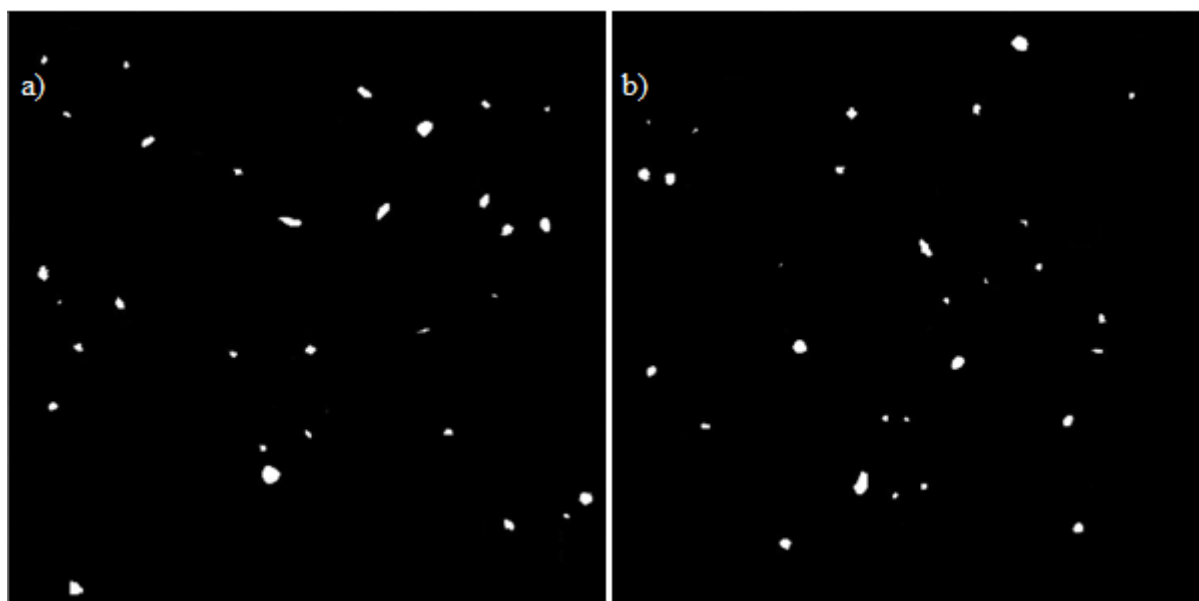


Obr. 33. Snímek K15/Snimek050T

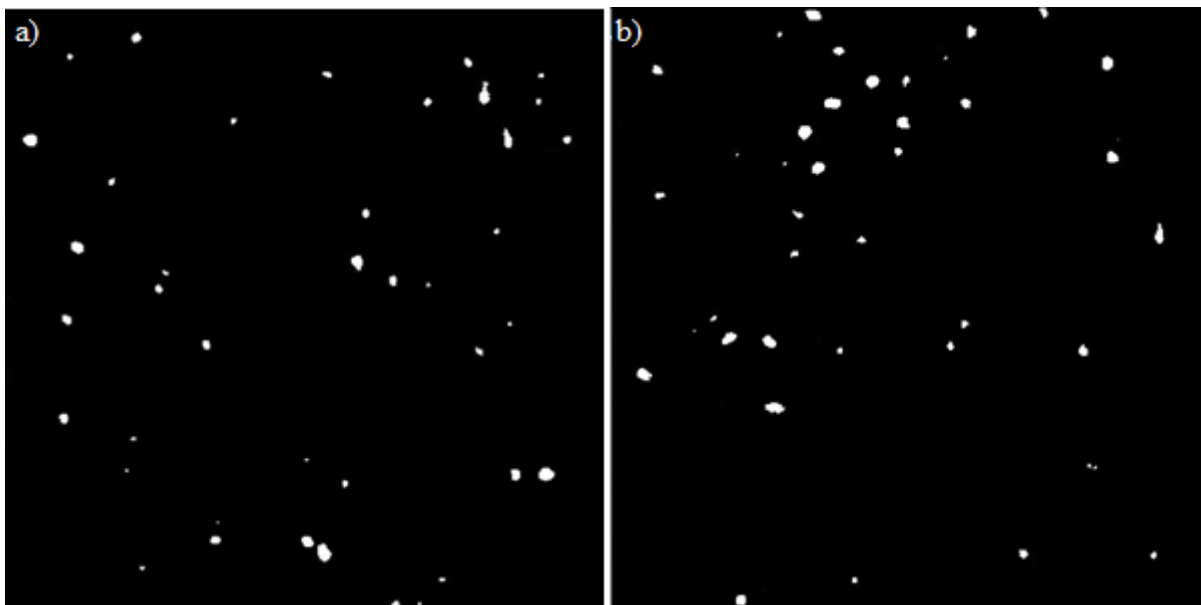


Obr. 34. Snímek K20/Snimek050T

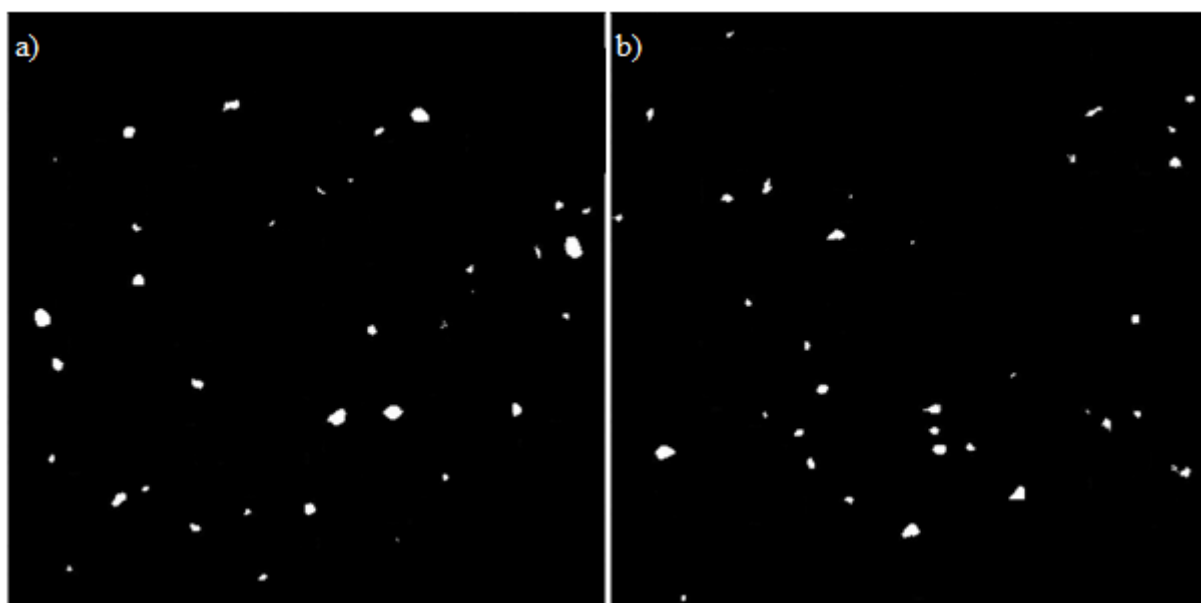
Výřezy snímků ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu, na kterých jsou ponechána pouze zrna, u nichž byly nalezeny jejich počáteční a koncové pozice, jsou ukázány na Obr. 35, Obr. 36 resp. Obr. 37.



Obr. 35. Ve snímcích a) K10/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K10/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice



Obr. 36. Ve snímcích a) K15/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K15/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice



Obr. 37. Ve snímcích a) K20/Snimek050T/200-600,201-601 a b) K20/Snimek050T/400-800,650-1050 nalezená zrna, u kterých lze snadno definovat hranice

3.2.2.1 Střední rozměry zrn

Při snímání struktury koherenční zrnitosti pod úhlem 10° mezi směrem pozorování a dopadajícím laserovým svazkem, bylo ve vybraných oblastech snímku Snimek050T nalezeno

v 372 světlých plochách o celkovém obsahu 41 426 pixel² celkem 61 nepřekrývajících se zrn. Jejich podélné resp. příčné rozměry jsou vypočteny v Tab. 11 resp. Tab. 12.

Tab. 11. Délky vybraných zrn ve snímku K10/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	47	49	41	44	45	46	38	43	45	28	37	37	37	49	50	30	38	44	46
K	53	64	52	57	63	72	59	56	65	55	74	57	56	51	58	52	51	51	62
R	6	15	11	13	18	26	21	13	20	27	37	20	19	2	8	22	13	7	16

P	53	42	44	50	44	40	49	36	50	40	45	47	42	46	46	46	41	41	37
K	61	58	57	52	56	50	66	50	53	74	59	67	60	51	52	57	57	63	59
R	8	16	13	2	12	10	17	14	3	34	14	20	18	5	6	11	16	22	22

P	46	41	48	36	39	46	37	34	34	40	41	47	46	48	41	47	47	46	45
K	61	52	54	56	52	57	62	51	51	57	59	52	54	76	66	54	57	52	56
R	15	11	6	20	13	11	25	17	17	17	18	5	8	28	25	7	10	6	11

P	28	50	42	41
K	55	52	59	66
R	27	2	17	25

Tab. 12. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K10/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	10	10	16	17	36	37	58	3	28	51	13	23	24	14	108	62	13	18	10
P	19	19	23	24	35	36	45	10	31	42	21	28	29	22	61	46	21	25	19

O	30	34	7	40	40	53	56	19	40	74	6	49	10	54	3	5	34	20	43
P	32	34	16	37	37	43	44	26	37	50	14	41	19	43	10	13	34	26	38

O	46	2	31	61	17	95	39	11	35	11	15	9	14	37	55	14	18	10	16
P	40	8	33	46	24	57	37	19	35	19	23	18	22	36	44	22	25	19	23

O	56	8	26	79
P	44	17	30	52

Průměrná délka zrn pozorovaných ve vzdálenosti 35 cm od odrazného předmětu při úhlu pozorování 10° se směrem laserového svazku dopadajícího kolmo na povrch předmětu je 15,05 mm. Střední průměr těchto zrn je 32,51 μm a jejich středy se nacházejí průměrně ve vzdálenosti 35,20 cm od odrazného předmětu.

Při zvětšení úhlu mezi úhlem pozorování a laserovým svazkem dopadajícím kolmo na povrch předmětu na 15°, bylo izolováno v polovině rozsahu posuvného stolku 375 světlých plošek o obsahu celkem 38.679 px, v nichž bylo nalezeno 80 ohraničených zrn. Jejich podélné rozměry jsou uvedeny v tabulce Tab. 13 a příčné velikosti v tabulce Tab. 14.

Tab. 13. Délky vybraných zrn ve snímku K15/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	46	48	38	46	43	38	47	46	36	48	52	41	40	31	48	48	35	48	36
K	57	61	53	52	59	60	60	60	53	50	55	52	54	52	53	61	59	58	70
R	11	13	15	6	16	22	13	14	17	2	3	11	14	21	5	13	24	10	34

P	47	50	40	30	42	42	50	40	38	48	45	42	48	42	37	49	49	49	44
K	58	62	54	54	52	63	61	63	65	55	58	51	54	69	67	66	53	67	55
R	11	12	14	24	10	21	11	23	27	7	13	9	6	27	30	17	4	18	11

P	49	47	42	41	43	38	40	36	43	37	45	42	49	44	34	41	41	31	44
K	51	60	61	57	60	50	54	56	55	52	63	66	50	70	52	53	52	55	54
R	2	13	19	16	17	12	14	20	12	15	18	24	1	26	18	12	11	24	10

P	48	48	48	38	39	37	37	36	46	46	49	25	42	19	46	25	31	48	36
K	60	54	60	61	69	65	61	65	59	51	54	52	60	54	51	52	66	84	58
R	12	6	12	23	30	28	24	29	13	5	5	27	18	35	5	27	35	36	22

P	44	35	41	33
K	58	53	67	70
R	14	18	26	37

Tab. 14. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K15/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	31	11	12	61	17	53	21	9	32	25	31	6	2	4	7	30	19	23	23
P	33	19	20	46	24	43	27	18	33	29	33	14	8	12	16	32	26	28	28

O	70	48	10	13	21	20	9	6	25	57	6	16	37	4	13	69	78	46	5
P	49	41	19	21	27	26	18	14	29	44	14	23	36	12	21	49	52	40	13

O	8	23	8	59	31	27	55	64	64	3	4	52	22	21	14	48	15	19	16
P	17	28	17	45	33	30	44	47	47	10	12	42	28	27	22	41	23	26	23

O	8	11	50	52	57	66	34	28	3	22	53	31	51	1	23	47	17	19	35
P	17	19	41	42	44	48	34	31	10	28	43	33	42	6	28	40	24	26	35

O	8	26	36	14
P	17	30	35	22

Průměrná délka resp. šířka nalezených zrn je v tomto případě 16,63 mm resp. 30,87 μm . Průměrně se středy těchto zrn nacházejí ve vzdálenosti 35,00 cm od povrchu odrazného předmětu.

Při posledním uspořádání měření s kolmým dopadem laseru na hliníkový předmět bylo kamerou pohybováno pod úhlem 20° vzhledem k normále odrazné stěny. Ve vzdálenosti 35 cm bylo pozorováno 307 světlých plošek o celkovém obsahu 43 105 pixel² a z nich bylo vybráno 70 interferenčních zrn, jejichž podélné a příčné rozměry jsou uvedeny v tabulkách Tab. 15 a Tab. 16.

Tab. 15. Délky vybraných zrn ve snímku K20/Snimek050T

V řádcích P je uvedeno číslo snímku, ve kterém bylo zrno poprvé pozorováno. V řádcích K je uvedeno číslo posledního snímku, ve kterém se zrno ještě objevuje. Tučně zvýrazněný rozdíl R prvních dvou hodnot odpovídá délce zrna v mm.

P	42	47	49	45	40	44	35	48	43	43	48	43	44	48	45	50	48	44	23
K	74	70	51	66	59	67	50	61	51	62	55	92	57	52	69	53	85	53	57
R	32	23	2	21	19	23	15	13	8	19	7	49	13	4	24	3	37	9	34

P	22	35	43	35	40	47	32	47	36	47	44	48	43	43	37	42	42	46	47
K	60	56	53	50	60	58	51	57	54	54	63	57	59	60	60	57	54	53	73
R	38	21	10	15	20	11	19	10	18	7	19	9	16	17	23	15	12	7	26

P	49	49	46	45	45	50	43	37	48	44	35	34	45	49	34	33	49	44	47
K	69	57	54	50	51	59	57	51	66	51	47	55	74	76	53	54	60	53	53
R	20	8	8	5	6	9	14	14	18	7	12	21	29	27	19	21	11	9	6

P	36	48	44	49	25	36	49	42	39	37	45	31	44
K	51	69	66	51	67	50	57	55	50	68	51	53	56
R	15	21	22	2	42	14	8	13	11	31	6	22	12

Tab. 16. Průměry průřezů vybraných zrn ve snímku K20/Snimek050T

V řádcích O je uveden počet pixelů odpovídající obsahu průřezu zrna. V řádcích P je uveden tučně zvýrazněný vypočtený průměr zrna v μm .

O	2	47	17	44	96	44	37	10	17	26	53	9	13	16	43	84	90	29	4
P	8	40	24	39	57	39	36	19	24	30	43	18	21	23	38	54	56	32	12

O	5	8	22	49	83	21	14	15	17	123	7	14	11	41	14	10	22	3	34
P	13	17	28	41	53	27	22	23	24	65	16	22	19	38	22	19	28	10	34

O	30	19	54	12	17	35	6	20	27	82	20	11	73	65	10	21	47	24	29
P	32	26	43	20	24	35	14	26	30	53	26	19	50	47	19	27	40	29	32

O	5	43	5	3	13	19	18	12	38	7	33	21	14
P	13	38	13	10	21	26	25	20	36	16	34	27	22

Průměrná délka nalezených zrn činí 16,44 mm, průměrná šířka 31,57 μm a průměrná vzdálenost jejich středů od roviny předmětu 35,05 cm.

3.3 Diskuze

V souladu s teoretickými předpoklady byla při měření pozorována struktura koherenční zrnitosti, jež vycházela ze středu laserem osvětlené stopy na drsném předmětu. Interferenční zrna byla protáhlého tvaru, který připomínal tvar doutníků.

Kolmé průřezy zrn se jevily sobě velmi podobné ve všech případech, kdy měly být teoreticky kruhové i téměř kruhové. Neměly přesně pravidelnou hranici a podobaly se mírně protáhlým elipsám. Toto protažení může být způsobeno deformací kruhového průřezu svazku po průchodu optickou čočkou, dále pohybem kamery ve směru odchylojícím se od osy zrna. Velkou roli také hrají rozlišení kamery, jejíž pixely mají nezanedbatelné rozměry, a samozřejmě statistický charakter jevu koherenční zrnitosti.

Množství zrn pozorovaných na stejných oblastech CCD čipu při různých parametrech měřicí soustavy, ve vzdálenosti 35 cm od odrazného předmětu, u nichž bylo možné v zaznamenaných snímcích struktury koherenční zrnitosti nalézt jejich počáteční a koncové body, jsou uvedeny v Tab. 17. Světlych, ohraničených ploch bylo ve, dvojnásobkem střední intenzity prahovaných, snímcích podstatně více (Tab. 18).

Tab. 17. Počet nalezených zrn, z kterých byly počítány střední rozměry zrn, při různých uspořádáních měřicí soustavy

Uspořádání (K=kolmo) [°]	10	15	20	K10	K15	K20
Počet zrn [-]	106	81	107	61	80	70

Tab. 18. Počet zaznamenaných světlych plošek ve vzdálenosti 35 cm od povrchu předmětu, při různých uspořádáních měřicí soustavy

Uspořádání (K=kolmo) [°]	10	15	20	K10	K15	K20
Počet zrn [-]	372	364	356	372	375	407

Z údajů v tabulce Tab. 17 se toho nedá mnoho vyčíst. Není pozorována žádná závislost při zvyšování úhlu pozorování. Při kolmém dopadu laserového svazku na odrazný předmět bylo nejvíce zrn nalezeno při snímání struktury koherenční zrnitosti pod úhlem 15° vzhledem k laserovému svazku, naopak při jiném osvětlení kvádru bylo pod úhlem 15° vzhledem k laserovému svazku zrn nejméně.

Dále si lze v tabulce Tab. 17 všimnout velkého úbytku zrn při měření s předmětem osvětleným pod malými úhly (sloupce 2 až 4) a úhlem nulovým (sloupce 5 až 7). Ovšem jen při detekci pole pod úhly 10° a 20°. Při úhlu 15° jsou čísla téměř identická. Co se tedy týče ohraničitelných zrn, protože byla vybírána z přibližně stejně velkých vzorků, jeví se jejich množství v nich jako zcela náhodné. Zamítnutí tzv. překrývajících se zrn, může mít za následek zkreslení statistických, středních rozměrů, jelikož u větších zrn je větší šance, že se budou v prostoru „dotýkat“ zrn sousedních.

Střední intenzity světla zaznamenané na pixelech kamery mají s rostoucí vzdáleností od odrazného předmětu klesající exponenciální průběhy. Hodnoty středních intenzit ve vzdálenosti 35 cm od čelní roviny předmětu jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19. Střední intenzity zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu při různých uspořádáních měřicí soustavy

Uspořádání (K=kolmo) [°]	10	15	20	K10	K15	K20
Střední intenzita [-]	18,62	23,28	22,69	19,48	15,62	7,25

Při osvětlení čelní stěny předmětu kolmo dopadajícím laserovým svazkem je s rostoucím úhlem detekce pozorován úbytek intenzity světla, kdežto v případě různých úhlů dopadu laserového svazku není závislost zřejmá.

Střední podélná velikost i střední příčný rozměr zrn ve struktuře koherenční zrnitosti jsou pro různá uspořádání měření teoreticky stejná. Nezáleží tedy ani na úhlu dopadu laserového svazku na odrazný předmět, ani na úhlu mezi normálou čelní stěny předmětu a kamerou. Teoretické i pozorované střední délky zrn jsou shrnuty v Tab. 20.

Tab. 20. Teoretické i za různých uspořádání měřené střední podélné rozměry zrn objevujících se ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu

Uspořádání (K=kolmo) [°]	Teoreticky	10	15	20	K10	K15	K20
Střední délka [mm]	18,04	18,93	17,17	21,24	15,05	16,63	16,44

Správně by měla být uvažována pouze zrna, jejichž středy se nacházejí přesně ve vzdálenosti 35 cm od povrchu předmětu, jelikož z nich je střední podélný rozměr zrn definován. Ale vzhledem k tomu, že takových zrn bylo nalezeno celkem pouze 28, byly

střední délky v jednotlivých uspořádáních počítány z délek zrn alespoň procházejících rovinou vzdálenou 35 cm od předmětu. Takto se počet zrn zvýšil na 505. Toto vnáší do výsledků jistou chybu. Je možné se pokusit o korekci a spočítat jak by se rozměry změnilly (Tab. 21), kdyby byla zrna centrována v požadované rovině.

Tab. 21. Střední podélné rozměry zrn z Tab. 20 přepočtené pro středy zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu

Uspořádání (K=kolmo) [°]	Teoreticky	10	15	20	K10	K15	K20
Střední délka [mm]	18,04	18,50	17,35	21,19	14,99	16,69	16,24

Největší rozdíl v naměřených a přepočítaných hodnotách středních délek je 0,43 mm. Teoretický střední podélný rozměr (Tab. 21, sloupec 2) a pozorované hodnoty (Tab. 21, sloupce 3 až 8) jsou si velmi blízké, největší rozdíl je roven 3,15 mm. Nepatrně nižší střední délky byly získány v případech, kdy laserový svazek dopadal kolmo na odrazný předmět. Odchyly od teoretické střední hodnoty mohou být způsobeny příliš velkým krokem posunutí kamery 1 mm, statistickým charakterem koherenční zrnitosti a zamítnutím překrývajících se zrn. Nebylo nalezeno žádné zrno, objevující se na snímcích ve vzdálenosti 35 cm od předmětu, které by svou délkou přesahovalo rozsah posunutí kamery o 5 cm.

Střední příčné rozměry zrn byly určovány ze stejných souborů zrn, ze kterých byly počítány i střední podélné velikosti. Nebylo snadné vyhodnocovat rozměry ne úplně pravidelných průřezů zrn. Proto bylo s obsahy světlých ploch zacházeno jako s kruhovými a byly vypočítávány jejich průměry. Střední příčné rozměry zrn, ve vzdálenosti 35 cm od odrazného předmětu, teoretické i za různých podmínek měření získané jsou uvedeny v tabulce Tab. 22.

Tab. 22. Teoretické a zjištěné střední příčné rozměry vybraných zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu

Uspořádání (K=kolmo) [°]	Teoreticky	10	15	20	K10	K15	K20
Střední šířka [μm]	53,42	31,85	34,71	34,01	32,51	30,87	31,57

Teoretický střední příčný rozměr interferenčních zrn se zřetelně liší od pozorovaných hodnot, které jsou při všech uspořádáních měření sobě velmi podobné. Teoretická zrna mají střední průměr průřezu přibližně rovný deseti pixelům použité CCD kamery (rozteč pixelů:

5,2 μm x 5,2 μm), kdežto zrna pozorovaná mají střední průměr pouze asi šest pixelů. Tento rozkol není možné interpretovat jako chybu způsobenou relativně velkými pixely kamery, které jinak získané rozměry určitě zkreslují, ani jako důsledek přepočítávání průřezu na kruhový. Nasnadě je statistický charakter jevu koherenční zrnitosti a také eliminace velkého počtu, zvláště větších, světlých ploch na jednotlivých snímcích.

Pokud jsou střední příčné rozměry počítány ze všech světlých ploch (převedených na kruhy) vyskytujících se ve stejných oblastech, ve kterých byla hledána ohraničená zrna, jsou jejich velikosti za různých podmínek uspořádání měřicí sestavy větší, viz tabulka Tab. 23.

Tab. 23. Teoretické a zjištěné střední příčné rozměry zrn ve vzdálenosti 35 cm od povrchu odrazného předmětu při uvažování všech světlých ploch ve snímcích struktury koherenční zrnitosti

Uspořádání (K=kolmo) [°]	Teoreticky	10	15	20	K10	K15	K20
Střední šířka [μm]	53,42	62,22	64,66	61,55	61,92	59,59	65,53

Při uvažování všech světlých ploch, pozorovaných na výřezech pořízených snímků ve vzdálenosti 35 cm, jsou získané střední příčné rozměry mnohem blíže předpovězené hodnotě. Stále zde však existuje malá odchylka, která může být způsobena opět buďto velkými rozměry pixelů kamery, mírným prahováním pořízeného snímku, statistickým charakterem koherenční zrnitosti, anebo také pouze výběrem vzorce (12) pro teoretické hodnoty.

Závěr

Cílem diplomové práce byla analýza tvaru interferenčního zrna ve struktuře koherenční zrnitosti. V poli koherenční zrnitosti vytvořeném při odrazu laserového svazku od drsného hliníkového předmětu bylo s krokem posunutí 1 mm ve směru šíření zrn pohybováno v rozsahu 10 cm CCD kamerou. Takto získané snímky šesti různých uspořádání měření byly importovány do programu MATLAB a v něm upravovány. Z typických zašuměných snímků koherenční zrnitosti byly prahováním, s hodnotou prahu rovnající se dvojnásobku střední intenzity snímku, získány na černém pozadí jasně ohraničené světlé plochy odpovídající kolmým průřezům zrn. Prohlížením po sobě jdoucích obrázků byla hledána zrna, jejichž průřezy se vynořují ze tmy, objevují se na snímku pořízeném v polovině rozsahu posunutí kamery, tedy ve vzdálenosti 35 cm od předmětu, a následně do tmy znovu mizí. Některá taková zrna byla dále v programu MATLAB prostorově vykreslena viz kapitola 2.2 a Příloha 1. Podlouhlý tvar získaných zrn připomínající doutník je v dobré shodě se z teoretických úvah předpokládaným vzhledem. Statistický charakter jevu koherenční zrnitosti má za důsledek, že v případě světelných zrn je třeba počítat s jejich středními rozměry. Tzv. střední podélný a střední příčný rozměr jsou dány vzorci (12) a (13). Hodnoty středních podélných rozměrů v pozorovaných souborech detekovaných zrn se veskrze blížily své teoretické hodnotě 18,04 mm. Největší rozdíl mezi nimi byl 3,15 mm. Za tuto odchylku mohou s velkou pravděpodobností nastavení velkého kroku posunu kamery a statistický charakter koherenční zrnitosti. Střední příčné rozměry zrn měly teoreticky nabývat hodnoty 53,42 μm , ale měřeními byly zjištěny šířky v rozmezí 30,87 μm - 34,71 μm . Toto může být způsobeno statistickým charakterem koherenční zrnitosti, ale spíše se jedná o chybu vzniklou zavržením zrn, u nichž nebylo možné přesně lokalizovat jejich hranice. Při uvažování všech detekovaných světlých ploch se střední šířky zrn pohybovaly mezi 59,59 μm – 65,53 μm . Tato čísla jsou velmi blízká svému teoretickému rozměru, jejich odchylka je způsobena velkými pixely kamery a nejednoznačným vyjádřením vzorce pro střední příčný rozměr.

Seznam použitých zdrojů

[1] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Fundamental of Optics*. New York : John Wiley & Sons, 1991. 947 s. ISBN 0-471-83965-5.

[2] PEDROTTI, S.J., Frank L.; PEDROTTI, Leno S. *Introduction To Optics*. Second edition. New Jersey : Prentice Hall, 1993. 602 s. ISBN 0-13-016973-0.

[3] HRABOVSKÝ, M.; BAČA, Z.; HORVÁTH, P. *Koherenční zrnitost v optice*. první vydání. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2001. 304 s. ISBN 80-244-0286-6.

[4] DAINTY, J. C. *Laser Speckle And Related Phenomena*. Second Enlarged Edition. Berlin : Springer, 1984.

[5] GOODMAN, J. W. Some fundamental properties of speckle. *Journal of the Optical Society of America*. 1976, Vol. 66, Issue 11, s. 1145-1150. ISSN 00303941.

[6] ŠMÍD, P. *Užití korelace polí koherenční zrnitosti pro měření v mechanice* [online]. 2007, Aktualizace 07. 06. 2007 [cit. 2010-07-12]. Společná laboratoř optiky. Dostupné z WWW: <<http://jointlab.upol.cz/info/uziti-korelace-poli-koherencni-zrnitosti-pro-mereni-v-mechanice>>.

[7] DONATI, S. *Electro-Optical Instrumentation : Sensing and Measuring With Lasers*. 1st Printing. [s.l.] : Prentice Hall, 2004. 448 s. ISBN 0-13-061610-9.

[8] LI, Q. B.; CHIANG, F. P. Three-dimensional dimension of laser speckle. *Applied Optics*. 1992, Vol. 31, Issue 29, s. 6287-6291.

[9] CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics : Part 27: Speckle Size Estimates. *Experimental Techniques*. 2007, Volume 31, Issue 3, s. 19-22.

[10] LEUSHACKE, L. ; KIRCHNER, M. Three-dimensional correlation coefficient of speckle intensity for rectangular and circular apertures. *Journal of the Optical Society of America A*. 1990, Vol. 7, Issue 5, s. 827-832.

[11] HLAVÁČ, V.; SEDLÁČEK, M. *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 3. Praha : České vysoké učení technické, 2009. 252 s. ISBN 978-80-01-04442-1.

[12] VACARDA, M. Detekce jasových změn v obrazu pomocí lokálních spektrálních hustot energie. *Automatizace*. 2007, Ročník 50, Číslo 12, s. 772-775.

[13] ALEXANDER, T. L.; HARVEY, J. E. ; WEEKS, A. R. Average speckle size as a function of intensity threshold level: comparison of experimental measurements with theory. *Applied Optics*. 1994, Vol. 33, Issue 35, s. 8240-8250.

[14] MAŃDZIUK, J.; GORECKI, CH.; MACUKOW, B. Cross Absolute Filter for Removing Speckle Noise from Interference Patterns. *Optical Review*. 1996, Volume 3, Issue 4, s. 269-275.

[15] LI, Y. ; MOLONEY, C. *Selective Wavelet Coefficient Soft-Thresholding Scheme for Speckle* [online]. 1997 [cit. 2010-07-12]. 5 s. Memorial University of Newfoundland . Dostupné z WWW: <<http://www.iwaenc.org/proceedings/1997/nsip97/pdf/scan/ns970322.pdf>>.

[16] SIMARD, M. *Extraction of information and Speckle Noise Reduction in SAR Images Using the Wavelet Transform* [online]. 1998 [cit. 2010-07-12]. 3 s. NASA-Jet Propulsion Laboratory. Dostupné z WWW: <trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/19375/1/98-0720.pdf>.

[17] JOENATHAN, CH.; HAIBLE, P.; TIZIANI, H. J. Speckle Interferometry with Temporal Phase Evaluation: Influence of Decorrelation, Speckle Size, and Nonlinearity of the Camera. *Applied Optics*. 1999, Vol. 38, Issue 7, s. 1169-1178.

[18] GARCÍA, J., et al. Projection of speckle patterns for 3D sensing . *Journal of Physics: Conference Series*. 2008 [cit. 2010-07-12], Volume 139, Number 1 , s. 1-6.

Dostupný také z WWW: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/139/1/012026/pdf/jpconf8_139_012026.pdf>.

[19] NICKLAWY, M., et al. Characterizing Surface Roughness By Speckle Pattern Analysis. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2009 [cit. 2010-07-12], Vol. 68, s. 118-121. Dostupný také z WWW: <<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/2903/1/JSIR%2068%282%29%20118-121.pdf>>.

[20] WANG, W., et al. Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement . *Optics Communications*. 2005, Volume 248, Issues 1-3, s. 59-68.

[21] KIHM, K. D. Laser Speckle Photography Applied for Heat and Mass Transfer Problems. *Advances in Heat Transfer*. 1997, Volume 30, s. 255-311.

[22] YAITSKOVA, N. Statistics of undevelop ed speckles in partially polarized light. In *1st AO4ELT conference*, 2010. s. 6.

[23] GARCÍA, J.; ZALEVSKY, Z.; FIXLER, D. Synthetic aperture superresolution by speckle pattern projection. *Optics Express*. 2005 [cit. 2010-07-12], Vol. 13, Issue 16, s. 6073-6078. Dostupný také z WWW: <faculty.biu.ac.il/~fixeled/oEx.pdf>.

[24] SHVEDOV, V. G., et al. Selective trapping of multiple particles by volume speckle field. *Optical Society of America*. 2010, Vol. 18, No. 3, s. 3137-3142.

[25] GORBATENKO, B.B.; RYABUKHO, V.P.; MAKSIMOVA, L.A. Reconstructing an object image using the laser speckle pattern of the diffraction field . *Technical Physics Letters*. 2006, Volume 30, Number 9, s. 741-743. ISSN 1090-6533.

[26] GOODMAN, R. S.; FIENUP, J. R.; IDELL, P. S. Image synthesis from nonimaged laser-speckle patterns. *Optics Letters*. 1987, Vol. 12, Issue 11, s. 858-860.

[27] ZHU, H.-M.; WU, Y.-Y.; WANG, Y.-G. Average longitudinal size of ultrasonic speckles back-scattered from an interface. *Archive of Applied Mechanics*. 2004, Volume 73, Numbers 11-12, s. 841-845. ISSN 1432-0681.

[28] PEETERS, W.H.; MOERMAN, J.J.D.; VAN EXTER, M. P. Observation of Two-Photon Speckle Patterns. *Physical Review Letters*. 2010 [cit. 2010-07-12], vol. 104, Issue 17, s. 173601-1-4. Dostupný také z WWW: <<http://www.molphys.leidenuniv.nl/qo/pubs/Peeters2010.pdf>>.

[29] FREUND, I.; KESSLER, D. A. Singularities in speckled speckle. *Optics Letters*. 2008, Vol. 33, Issue 5, s. 479-481.

[30] JANSSENS, P. Laser projector speckle measurements. 2009 [cit. 2010-07-12]. Dostupný také z WWW: <www.osiris-project.eu/.../laser_projector_speckle_measurements_sideurodisplay09.pdf>. ISSN 0097-966X.

[31] *The MathWorks : MATLAB - The Language Of Technical Computing* [online]. 1994, 2010 [cit. 2010-07-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>.

[32] CAMPR, P. *Získávání 3D modelů lidských tkání z obrazových dat CT*. 2005 [cit. 2010-07-12]. 58 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z WWW: <http://pavel.campr.cz/user_files/files/diplomova-prace-pavel-campr-2005.pdf>.

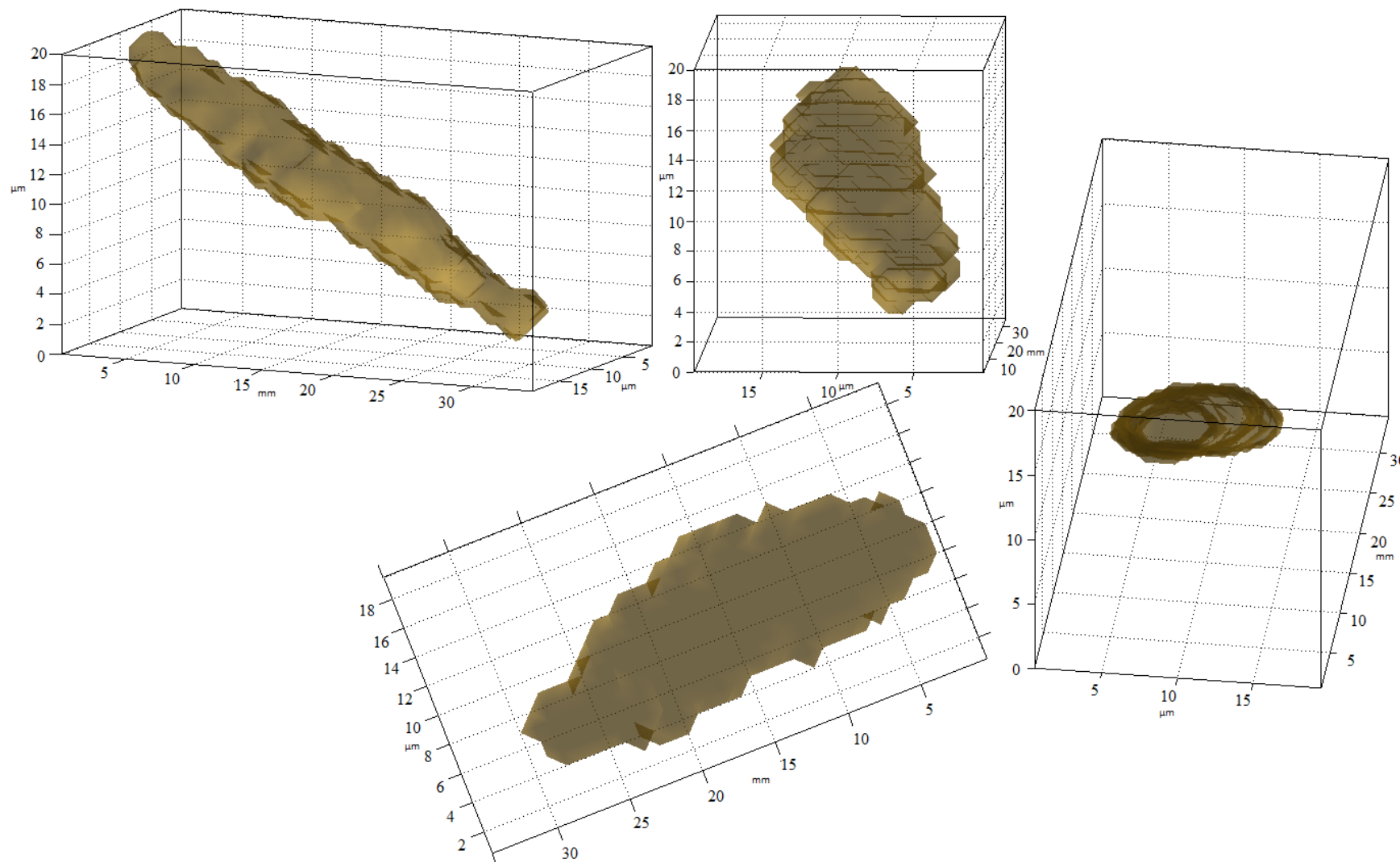
Seznam použitých symbolů a zkratek

a	délka hlavní poloosy eliptické světelné stopy na odrazném předmětu
$a(\vec{r})$	amplituda elektromagnetické vlny
c	rychlost světla
C	kontrast
d	šířka laserového svazku dopadajícího na odrazný předmět
D	průměr kruhové osvětlené plochy na odrazném předmětu
\vec{E}	vektor intenzity elektrického pole
f	ohnisková vzdálenost tenké čočky
$I(\vec{r})$	intenzita světla
$I_i(\vec{r})$	intenzita světla i -té elektromagnetické vlny
I_{\max}	maximální intenzita světla
I_{\min}	minimální intenzita světla
I_{prah}	stanovený práh intenzity
$\langle I \rangle$	střední intenzita světla
l_t	koherenční délka záření
Δf	rozdíl frekvencí
l_s	velikost prostorové koherence
$p(I)$	hustota pravděpodobnosti
$p(\varphi)$	hustota pravděpodobnosti
$R'(z)$	poloměr křivosti vlnoplochy
$R''(z)$	poloměr křivosti vlnoplochy po průchodu svazku tenkou čočkou
S_{po}	střední podélný rozměr zrn
$S_{př}$	střední příčný rozměr zrn
S/N	poměr signálu k šumu (Signal to Noise Ratio)
$U(\vec{r}, t)$	komplexní amplituda elektromagnetické vlny
$U^*(\vec{r})$	komplexně sdružená komplexní amplituda elektromagnetické vlny
$W(z)$	pološířka gaussovského svazku

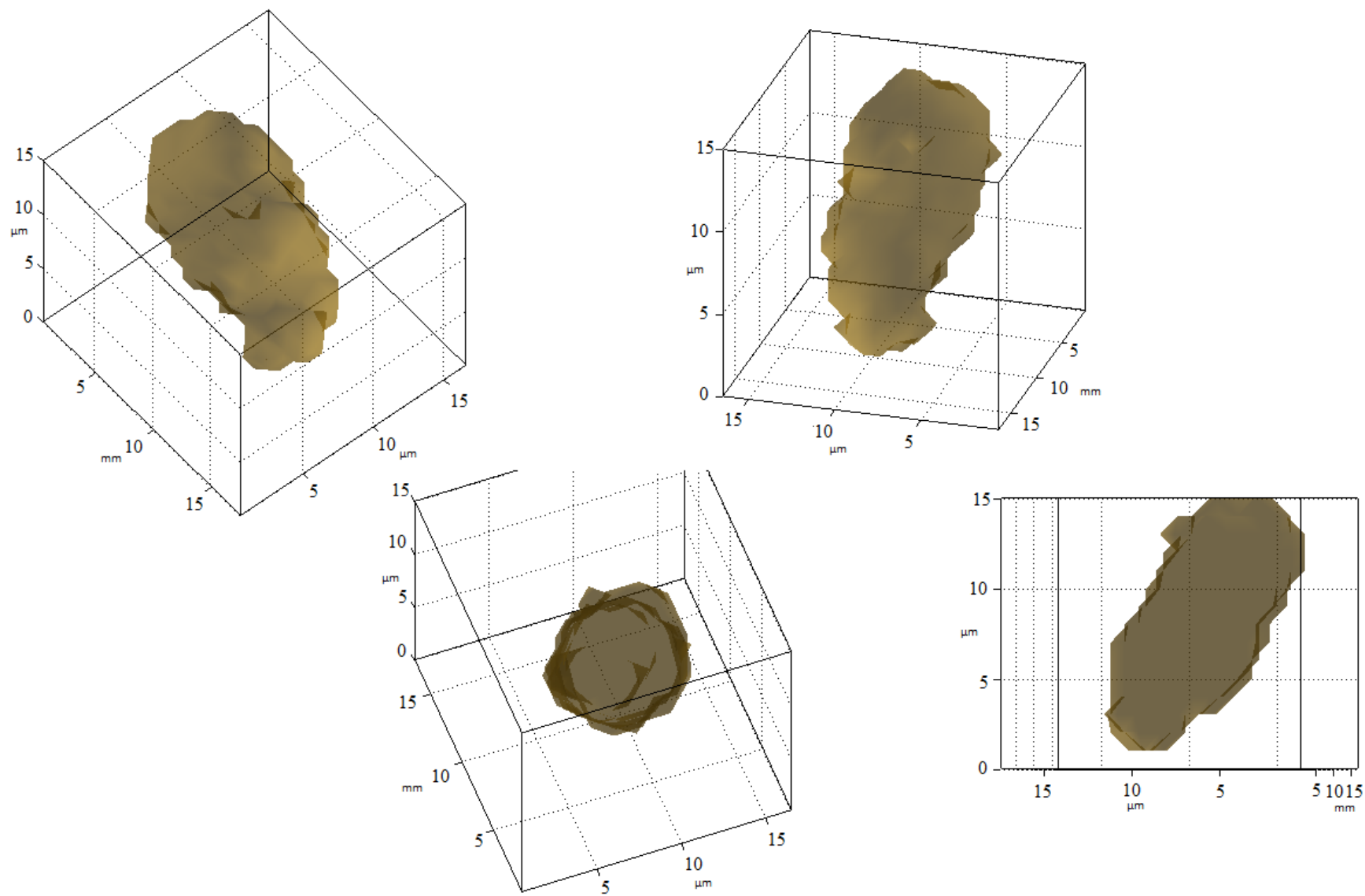
W_0	pološířka gaussovského svazku v místě maximálního zúžení svazku
W'_0	pološířka gaussovského svazku v místě maximálního zúžení svazku za čočkou
W_k	pološířka svazku v místě dopadu na odrazný předmět
z	vzdálenost kamery od odrazného předmětu
z_0	Rayleighova vzdálenost
z_p	vzdálenost od místa maximálního zúžení svazku
z'_p	vzdálenost od čočky, ve které je fokusován laserový svazek
α	úhel dopadu laserového svazku na předmět
$\Delta\varphi$	fázový rozdíl dvou elektromagnetických vln
θ	úhel mezi dvěma zdroji světla z bodu pozorování
λ	vlnová délka záření
ν	frekvence kmitání elektromagnetické vlny
σ_I	směrodatná odchylka intenzity
$\varphi(\vec{r})$	fáze elektromagnetické vlny

Příloha 1. Modely zrn pozorovaných při kolmém dopadu laserového svazku na odrazný předmět

a) Zrno pozorované v uspořádání, kdy bylo kamerou pohybováno pod úhlem 10° vzhledem k dopadajícímu laserovému paprsku



b) Zrno pozorované v uspořádání, kdy bylo kamerou pohybováno pod úhlem 15° vzhledem k dopadajícímu laserovému paprsku



c) Zrno pozorované v uspořádání, kdy bylo kamerou pohybováno pod úhlem 20° vzhledem k dopadajícímu laserovému paprsku

