

UNIVERZITA PALACKÉHO OLOMOUČ

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky



Dizertační práce

OPTICKÁ TOPOGRAFIE A JEJÍ VYBRANÉ APLIKACE

Dušan Mandát

Vedoucí doktorské práce: Prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.

Studijní program: Aplikovaná Fyzika

Olomouc 2011

Prohlašuji, že jsem svoji doktorskou práci vypracoval samostatně pod vedením Prof. RNDr. Miroslava Hrabovského, DrSc., za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci, dne 29. srpna 2011.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svojí rodině za psychickou podporu při tvorbě této práce. Svoji ženě Elišce a dceři Zoji. Velké poděkování patří vedoucímu této práce prof. Miroslavu Hrabovskému za odborné rady a oporu po celou dobu trávenou na pracovišti SLO UP Olomouc. Dále bych chtěl poděkovat mým spolupracovníkům za pomoc při experimentech. Obzvláště pak Miroslavu Pechovi, Liboru Nožkovi a Pavlu Horváthovi.

Obsah

1	Úvod a cíle práce	1
2	Vymezení základních pojmů	4
3	Vidění 3D prostoru	7
4	Rozdělení topografických metod	10
4.1	Kontaktní topografické metody	13
4.1.1	Měření pomocí univerzálního měřicího mikroskopu	13
4.2	Bezkontaktní topografické metody	13
4.2.1	Bodová měření	15
4.2.2	Profilovací měření	22
4.2.3	Plošná měření	23
5	Teorie 3D skenovací profilometrie	34
5.1	Výpočetní přístup	34
5.1.1	Citlivost a chyba metody	36
5.1.2	Chyby měření	39
5.1.3	Vliv tvaru a vlastnosti projektované struktury na chybu metody	40
5.1.4	Kompenzace optických vad měřicí sestavy	42
5.2	Kalibrační přístup	49
5.2.1	Kalibrace osy x	50
5.2.2	Kalibrace osy y	51
5.2.3	Kalibrace osy z	51

5.3	Analýza laserové stopy	55
5.4	Metody výpočtu středu laserové stopy	57
5.4.1	Metoda maxima	57
5.4.2	Metoda těžiště	58
5.4.3	Proložení Gaussovskou funkcí	60
5.4.4	Fourierova filtrace	61
5.5	Vliv justáže měřicí sestavy na chyby měření	65
5.5.1	Chyby způsobené posunem roviny procesu	65
5.5.2	Chyby způsobené natočením zdroje osvitů	66
5.5.3	Odlíšná osa jamky a osvitů	69
5.5.4	Kombinace obou chyb	69
5.6	Experimentální sestava	71
5.6.1	Světelný projektor	71
5.6.2	Rotační a translační motor	74
5.6.3	Záznamové zařízení	75
6	Měření opotřebení umělých kyčelních náhrad	76
6.1	Kyčelní kloub	76
6.1.1	Stanovení velikosti otěru kyčelního implantátu	79
6.2	Metody stanovení velikosti otěru in vivo	83
6.2.1	2D radiometrické měření	83
6.2.2	3D radiometrické měření	84
6.3	Metody stanovení velikosti otěru in vitro	86
6.3.1	Ultrazvuková měření	86
6.3.2	Gravimetrie	87
6.3.3	Měření pomocí kontaktní metody	87
6.4	Porovnání vybraných topografických měřicích metod při měření in vitro	95
6.4.1	Gravimetrické měření	96
6.4.2	Výpočetní metoda	96
6.4.3	Vstupní parametry opotřebení kloubních implantátů	97

6.4.4	Srovnávací měření	97
7	Měření otěru kyčelních implantátů pomocí 3D skenovací profilometrie	100
7.1	Kalibrace a justování experimentální sestavy	101
7.1.1	Justování experimentální sestavy	101
7.1.2	Kalibrace experimentální sestavy	102
7.1.3	Měření tvaru	104
8	Další aplikace optických topografických metod	109
8.1	Teorie Ronchi testu	110
8.1.1	Ronchi Test	110
8.1.2	Matematický popis	111
8.1.3	Difrakční teorie Ronchi testu	112
8.1.4	Případ se sférickou vlnou	113
8.1.5	Paprsková teorie Ronchi testu	113
8.1.6	Porovnání difrakční a paprskové teorie	114
8.1.7	Měření povrchu optických prvků	115
8.2	Digitální Ronchi test	118
8.2.1	Ronchi mřížka	118
8.2.2	Experimentální sestava	118
8.2.3	Posun fáze Ronchi mřížky	121
8.2.4	Vyhodnocení naměřených dat	121
8.2.5	Rekonstrukce povrchu	122
8.2.6	Chyby měření	124
8.2.7	Výsledky měření na zrcadlových segmentech	125
8.3	Analýza vad povrchů dílů určených pro automobilový průmysl	131
8.3.1	Nejčastější defekty na povrchu výlisků	131
8.3.2	Měřicí metoda	131
8.3.3	Výsledky testování	132
9	Závěr	134

Literatura	138
10 Autorovy publikace	144
A Programy a skripty vytvořené v prostředí Matlab	167
A.1 Metoda výpočtu středu stopy	167
A.2 Fourierova filtrace a rekonstrukce	169
A.3 Metoda nejmenších čtverců	170
A.4 Výpočet úbytků objemu vlivem špatného nastavení sestavy	172
A.5 Justování sestavy - střed rotace	173
A.6 Vyhodnocení Ronchi testu	176
B Programy v LabView	179
B.1 Ovládání měřicího procesu	179
C Experimentální vybavení	185
C.1 Kamera Lumenera	185
C.2 Požité objektivy	188

Kapitola 1

Úvod a cíle práce

Cílem předložené dizertační práce je komplexní popis vybrané optické topografické metody 3D skenovací profilometrie, její matematický aparát, princip metody, výpočet nejistot měření a modifikace metody pro různé typy aplikací. Metoda 3D skenovací profilometrie je aplikovaná na konkrétní problematiku měření opotřebením umělých kyčelních implantátů. Metoda se ukázala jako optimální pro daný typ měření a byla konfrontována s dvěma dalšími metodami. Jedná se o dlouhodobou klinickou studii na reálných implantátech extrahovaných pacientům po totální endoprotéze kyčelního kloubu. Studie je koordinována společně s pracovníky Ortopedické kliniky Fakultní Nemocnice Olomouc. Cílem je analyzovat úbytek hmoty implantátu vzhledem k řadě známých parametrů pacientů, který však není součástí disertační práce. Hlavním úkolem je poskytnout naměřená data objemového úbytku jamek kyčelních implantátů pro další analýzy. Jelikož životnost implantátu v lidském těle je řádově několik let, je nabírání dat časově náročné a projekt bude pokračovat v dalších letech. V současné době se testují a do praxe nastupují nové typy materiálů kyčelních implantátů. Proto se počítá s návaznou studií na toto téma. Výsledky této práce budou sloužit také pro porovnání měřících metod in vivo, které jsou reprezentovány radiometrickými metodami. V práci jsou popsány tyto metody a výpočtové algoritmy pro určení objemového úbytku in vivo. S přibývajícími daty se plní databáze měření, která bude zpřístupněna odborné veřejnosti pro další analýzu. Samozřejmostí je ochrana osobních údajů dle platné legislativy. Nutné je podotknout, že všichni pacienti souhlasili s použitím dat pro vědecké využití.

Práce nejprve analyzuje několik vybraných topografických metod, jejich rozdělení a dále je popsán současný stav na poli měření bezkontaktními optickými metodami, jejich historický vývoj a výhled do budoucna. Následují kapitoly se týkající obecné problematiky kyčelních implantátů a jsou zde uvedeny metody používané v dnešní praxi pro měření opotřebení implantátů in vivo a in vitro. Dále je popsána geneze měřicí metody určené k měření objemového úbytku. Vývoj šel přes kontaktní měřicí metody a skončil výběrem jedné optické topografické bezkontaktní metody. Zmiňovaná metoda byla aplikovaná na danou problematiku měření. Byla optimalizovaná měřicí sestava a vytvořen řídicí a vyhodnocovací software pro měřicí proces. Dále byla vytvořena databáze s naměřenými daty umístěná na serveru Společné laboratoře optiky UP a FZU AV ČR přístupná pro odbornou veřejnost. V závěru jsou uvedeny některé bezkontaktní optické metody vyvinuté a realizované během mého studia.

Principy a teorie dnes použitých metod jsou známy již desítky let. Většina současných metod je odvozena od základních principů optických topografických měřicích metod. Starší metody se modifikují a používají se nové optické zdroje a detektory, které posouvají citlivost a rozlišení metod. V současné době nastává velký rozmach bezkontaktních optických metod ve výzkumu a v průmyslových aplikacích. Vzhledem k obrovskému nárůstu výpočetního výkonu počítačů, zkvalitněním optických zdrojů, s rostoucím rozlišením detektorů a propustností sběrnic těchto zařízení je možné již dříve teoreticky popsané metody, které nebylo možno vzhledem k tehdejším technickým možnostem aplikovat v praxi, využít při měření ve výzkumu nebo v průmyslové praxi. Ruku v ruce s technickým pokrokem jde i vylepšování parametrů (jako citlivost a nejistota měření) těchto metod. S rostoucí kvalitou použitého vybavení se rozšiřuje prostor pro použití některých metod. Obrovský nárůst použití těchto metod zaznamenal hlavně automobilový průmysl. V tomto odvětví je nutné kontrolovat většinu vyrobených součástí s důrazem na kvalitu zpracování a tedy i rozměru. Zde se setkáváme s použitím metod pro měření malých součástek až po měření velkých tvarů a rozměrů celých karosérií, kvality zpracování povrchů a hledání různých druhů defektů výrobků. Používají se zde jak kontaktní, tak bezkontaktní měřicí metody, popř. jejich kombinace. V těchto případech se nabízí použití různých typů optických topografických metod, modifikovat je nebo vyvíjet nové. Velkým plusem pro výběr optických metod je

jejich bezkontaktní charakter, dostatečné rozlišení, rychlost měřicího procesu, flexibilita použití a rychlost zpracování.

Kapitola 2

Vymezení základních pojmů

V této kapitole jsou stručně vysvětleny pojmy se kterými se při měření geometrických parametrů objektů nejčastěji setkáváme.

Geometrie [1] je slovo řeckého původu a znamená zeměměřičství. Geometrie se zabývá vlastnostmi prostoru, různými algebraickými strukturami na topologických objektech (typicky na varietách).

Topografie [2] se obecně zabývá popisem měření tvaru a rozměru zkoumaných předmětů. Výsledkem těchto měření je topografická mapa, kde jednotlivé body jsou popsány souřadnicemi a odpovídají bodům na povrchu měřeného objektu (s určitou nejistotou danou metodou měření).

Optická topografie je topografie využívající optických systémů a zařízení pro zjištění měřených parametrů.

Topologie [3] je obor matematiky, který se zabývá vlastnostmi a vztahy útvarů, které se zachovávají při oboustranně spojitých vzájemně jednoznačných zobrazeních.

Souřadnicový systém - všechny geometrické útvary v prostoru je nutné lokalizovat. K tomu slouží souřadnicové soustavy, ve kterých je lokalizace uvedených útvarů dána několika souřadnicemi v n -dimenzionálním prostoru. Základní a nejvíce používané souřadnicové soustavy jsou např.: kartézská, polární, válcová aj.

Geometrické útvary lze dělit podle různých vlastností:

- základní geometrické útvary (např. bod, přímka, rovina, prostor),
- lineární geometrické útvary (např. přímka, polopřímka, úsečka),

- rovinné geometrické útvary (např. polorovina, mnohoúhelníky, kružnice, křivky a útvary vymezené křivkami,
- prostorové geometrické útvary – tělesa (hranoly (např. krychle, kvádr), apod.),
- množiny všech bodů dané vlastnosti.

Polohu bodu určuje ve zvoleném systému souřadnic množina čísel (souřadnice). Ty mohou určovat vzdálenosti nebo úhly vzhledem k referenčním bodům a přímkám soustavy. Výběrem souřadné soustavy určujeme význam souřadnic. Pro jednoznačné určení polohy bodu je nutné znát následující parametry:

- typ soustavy souřadnic,
- počátek soustavy souřadnic,
- směr, počet a charakter souřadných os,
- jednotky, pomocí kterých je možné vypočítat hodnoty souřadnic.

Pokud jsou souřadné osy v každém bodě prostoru na sebe navzájem kolmé, pak se hovoří o ortogonální soustavě souřadnic. Pokud jsou všechny souřadnicové osy přímkami, pak se hovoří o přímočaré soustavě souřadnic (např. kartézská). V případě křivek se soustavy označují jako křivočaré (např. polární). Ve fyzice se společně se soustavou souřadnic uvažuje další rozměr, kterým je čas. Většina popisovaných systémů a měřicích metod v této práci je statická (neměnná v čase) proto se nebude uvažovat dynamika bodů a těles.

Geometrické zobrazení je zobrazení, které každému bodu X útvaru P přiřazuje právě jeden bod X' útvaru P' . Bod X je tzv. vzor a bod X' se označuje jako obraz. Podle toho, které vlastnosti se při geometrickém zobrazení zachovávají a které se mění, lze geometrická zobrazení rozdělit na:

- podobné (stejnolehlost) – podobná zobrazení lze považovat za speciální případ shodných zobrazení,
- shodné (posunutí, rotace apod.) – shodná zobrazení lze považovat za speciální případ afinních zobrazení,

- afinní – zobrazení zachovávající rovnoběžnost přímek,
- topologické zobrazení – zachovává se pouze příslušnost bodu k dané křivce.

Geometrická zobrazení lze rozdělit podle dimenze transformovaného prostoru a podle toho, zda vzor i obraz mají stejnou dimenzi následovně:

- stejné dimenze vzoru a obrazu: *lineární* – např. posunutí bodu po přímce, *rovinné* – oproti lineárním obsahuje některá další zobrazení, např. rotace kolem bodu, *prostorové*, *více dimenzionální*.
- dimenze vzoru a obrazu jsou odlišné: *projektivní zobrazení* – např. rovnoběžné promítání, axonometrie, perspektiva, aj.

Detektor, detekční zařízení v oblasti elektromagnetického záření se jedná o zařízení které je schopno registrovat toto záření.

Pixel je nejmenší jednotka v digitální rastrové grafice. V záznamové technice je to minimální rozlišovací jednotka detektoru.

Světelný zdroj je zdroj elektromagnetického záření ve viditelné oblasti, *cca.400nm – 750nm*.

2D, 3D je dvoudimenzionální, resp. třídimenzionální souřadnicový systém.

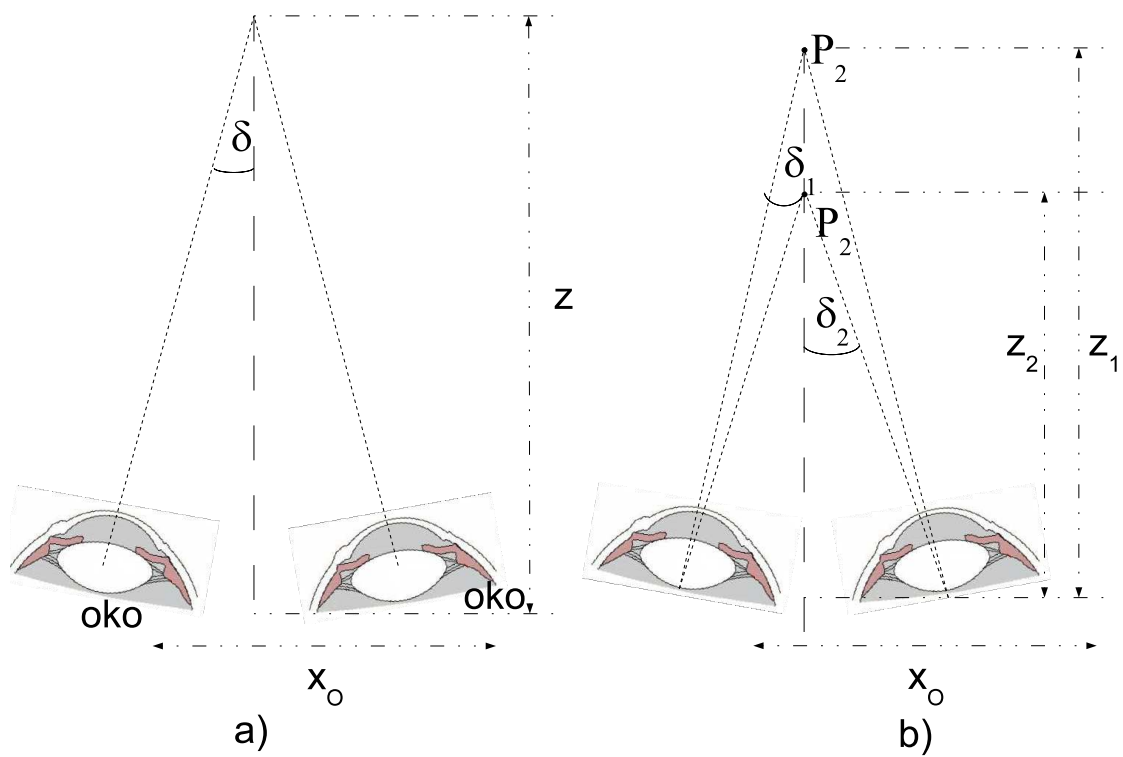
Kapitola 3

Vidění 3D prostoru

Kapitola vidění 3D prostoru popisuje jakým způsobem vnímá pozorovatel prostor kolem sebe, princip subjektivního hodnocení objektů a vzdáleností.

Z hlediska lidského vnímání se okolního svět jeví třírozměrně. V kartézském systému souřadnic je určen souřadnicemi x, y, z . Lidský zrak vnímá prostor pomocí dvojice senzorů - očí. Základní princip definice objektů v prostoru je založen na stereoskopii. Velkou roli hraje i zkušenost a učení vnímání prostoru. Lidský mozek je schopen i z jednoho obrazu (pomocí vidění jedním okem) odhadnout vzdálenosti ve všech osách 3D prostoru. Při monokulárním vidění využívá mozek několika základních poznatků z prostorového vidění. Vzdálenější předměty stejné velikosti se jeví menší než bližší, paralelní linie se zblíhají ve velké vzdálenosti, mění se intenzita předmětů v prostoru s rostoucí vzdáleností (vzhledem k propustnosti atmosféry). Stereo vidění je založeno na stereoskopii. Blíže se této metodě věnuje kapitola 4.2.3. Lidské oko může pracovat ve dvou módech. V prvním módu jsou optické osy obou očí rovnoběžné a vzdálenost mozek odhaduje na principu popsáném v kapitole 4.2.3. V druhém módu se obě oči zaměří na zkoumaný objekt a vyhodnocuje se velikost stereoskopické paralaxy (viz obrázek 3.1 (a)). Pro odhad vzdálenosti z a výpočet paralaxy δ platí vztah: $tg\delta = x_O/z$, kde x_O je vzdálenost očí. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi malé úhly, je možné $tg\delta$ nahradit δ . Princip odhadu vzdálenosti dvou předmětů je patrný z obrázku 3.1 (b). Pro porovnání obou bodů platí $\delta_1 < \delta_2 \Rightarrow z_1 > z_2$, Mezní hodnota rozlišení vzdálenosti z udává poloměr stereoskopického vidění z_0 a je dána vztahem:

$$z_0 = \frac{x_0}{\delta_0}, \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1: (a) Odhad vzdálenosti pomocí zjištění velikosti paralaxy. (b) Porovnání vzdáleností dvou předmětů v různé vzdálenosti porovnáním stereoskopických paralax.

kde δ_0 jsou mezní úhly natočení oka $\langle 10'' \div 30'' \rangle$. Maximální vzdálenost rozlišitelných bodů je cca 650 m. Vychází se ze statistických měření anatomie člověka, kdy vzdálenost očí je v intervalu $\langle 56 \div 70 \rangle$ mm. Rozlišení v ose z závisí právě na vzdálenosti x_0 . Maximum pro stereoskopickou paralaxu je 30° , což odpovídá vzdálenosti cca. 60 mm. Člověk je schopen rozpoznat vzdálenost i s průběhu intenzity pozorované scény (shape from shading) ze změny tvaru textury (shape from texture) atd. Tyto metody jsou využívány při měření povrchu předmětů v praxi s využitím "strojového vidění".

Kapitola 4

Rozdělení topografických metod

V této kapitole rozebereme několik topografických metod, rozčleníme je dle několika kritérií a zmíníme nejvýznamnější metody využívané v praxi. Podrobněji budou v práci popsány metody které byly použity při experimentech.

Topografické metody popisující kvalitativně a kvantitativně povrch zkoumaného předmětu lze dělit dle dvou základních kritérií. Prvním kritériem je kvantitativní míra popisu zkoumaného předmětu. Jednorozměrné měření (délkové) lze vyloučit z topografických metod, jelikož se jedná o pouhé měření jednoho rozměru, nepopisuje žádným způsobem tvar tohoto objektu. Druhým kritériem je dělení podle principu měření.

Dle prvního kritéria dělení rozlišujeme topografické metody popisující tvar a rozměr předmětů na plošná a prostorová měření:

- 2D měření - výsledkem je mapa n bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi: x_n, y_n , popisuje tvar i rozměr zkoumaného předmětu v ploše.
- 3D měření - výsledkem je mapa n bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi: x_n, y_n, z_n , v tomto případě dostáváme množinu bodů nesoucí oproti 2D navíc informaci o topografické výchylce předmětu z_n .

Druhým způsobem dělení topografických metod je jejich členění dle principu metody.

Tyto metody lze vyčlenit do dvou podskupin v závislosti na interakci přístrojového vybavení měřicí metody se zkoumaným objektem.

Dělení je následující:

- Kontaktní metody - dochází k přímému kontaktu přístrojového vybavení s měřeným objektem.
- Bezkontaktní metody - dochází ke zprostředkovanému kontaktu s měřeným objektem.

Zástupcem kontaktních metod je například kontaktní profilometr. Zařízení skenuje povrch pomocí kontaktního hrotu v předem definovaných bodech. Nevýhodou této metody je možné narušení povrchu stykem měřeného hrotu s povrchem předmětu. Nejčastěji jsou využívány tyto profilometry v průmyslu. Výhodou těchto zařízení je vysoká citlivost do 0.1 mm . Nevýhodou je dlouhá doba měření a případné poškození povrchu, které eliminuje použití těchto zařízení na úzkou skupinu aplikací. Dalším zástupcem v této skupině je např. profilometrický mikroskop.

Bezkontaktní metody lze dále dělit podle způsobu zprostředkované interakce měřicího zařízení s měřeným objektem:

- Bezkontaktní měření využívající obecně vlnění.
- Ostatní.

Mezi ostatní metody patří např. AFM nebo elektronový mikroskop (pokud uvažujeme elektron jako hmotnou částici).

AFM (Atomic Force Microscope) využívá měření vzájemné silové interakce atomů povrchu měřeného povrchu a hrotu měřicího zařízení. Interakce v tomto případě je zprostředkovaná silovým působením.

Elektronový mikroskop využívá k měření a popisu tvaru svazku elektronů odrazených od měřeného povrchu.

Metody využívající vlnění lze ještě dále dělit podle charakteru tohoto vlnění a vlnové délky použitého záření:

- Rentgenovská měření.
- Magnetická resonance.
- Využití elektromagnetického záření ve viditelném spektru.

- Radiové vlny.
- Mechanické vlnění prostředí - např. ultrazvuk.

Tyto metody jsou 2D a 3D. Například měření pomocí rentgenu je v praxi nejčastěji využíváno v medicíně, podobně jako magnetická resonance a ultrazvuk. Radiové vlny jsou nejčastěji používány v radiolokátorech (letectví, metrologie atd.). Nejvyužívanější topografické jsou bezkontaktní 2D-3D metody založené na detekci elektromagnetického záření v oblasti viditelného spektra cca $\lambda = 400 - 750nm$.

4.1 Kontaktní topografické metody

V této kapitole je popsán princip měření tvaru povrchu pomocí optického měřicího mikroskopu. Ač se nejedná o optickou měřicí metodu, je zde tato metoda uvedena vzhledem k jejímu použití při experimentu popsaném v kapitole 6.4.

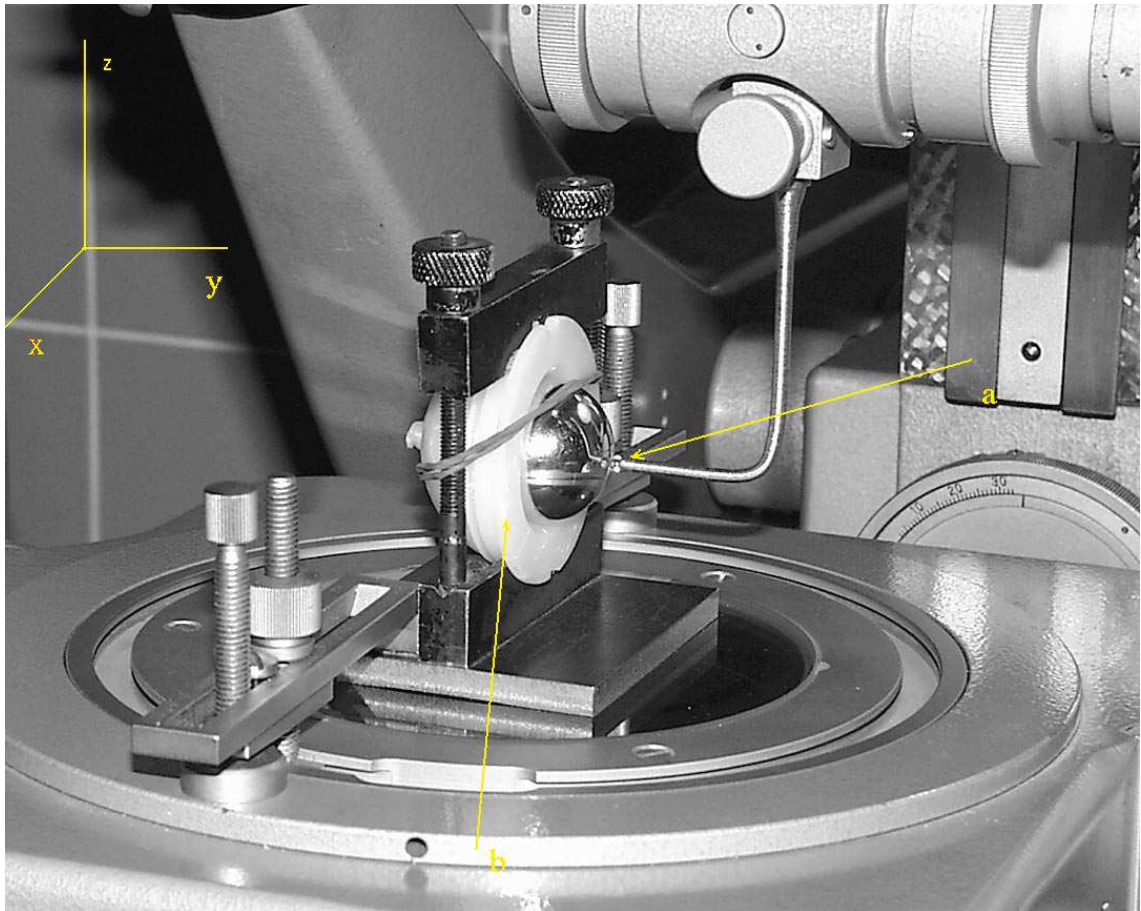
4.1.1 Měření pomocí univerzálního měřicího mikroskopu

Měřicí mikroskop (Carl Zeiss Jena 2650) umožňuje měřit rozměry předmětů s přesností na mikrometry. Měřit lze v odraženém světle i stínově. Mikroskop je schopen měřit v rozsahu $0 \div 200 \text{ mm}$ v ose x a $0 \div 100 \text{ mm}$ v ose y . V ose z přesností na setiny milimetru s rozsahem $0 \div 160 \text{ mm}$. Měření se provádí pomocí zrcátkové kontaktní sondy umístěné v ose z . Její pohyb v ose z ovlivňuje pohyb záměrných značek v okuláru. Tímto způsobem se definuje vztažný bod, jehož souřadnice x_i, y_i, z_i , se odečítají na příslušných stupnicích. Hrot kontaktní sondy je opatřen safírovou kuličkou o poloměru $(1,500 \pm 0,002) \text{ mm}$. Princip měření a snímek měřicího prostoru je na obrázku 4.1.

V roce 2008 byl proveden na měřicím mikroskopu upgrade, kdy bylo nahrazeno odečítání polohy v jednotlivých osách pomocí stupnice optometrickými inkrementálními snímači fy. Essa. Osy x, y byly osazeny snímači typu SL 128LB-102-S s délkovou přesností $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$

4.2 Bezkontaktní topografické metody

V této kapitole se budeme věnovat bezkontaktním topografickým metodám využívajícím koherentní i nekoherentní optické záření v rozsahu viditelných vlnových délek. Metody jsou řazeny od nejjednodušších po nejsložitější, ve smyslu přístrojového vybavení a způsobu vyhodnocení. Některé tyto metody doznaly širokého využití v praxi, zejména dálkoměry využívající laserové záření (viz např. [4], [5], [6]). Z těchto metod je podrobněji rozebrána a popsána 3D skenovací profilometrie, která byla použita při experimentech a měřeních. Tvoří jednu z hlavních kapitol předkládané práce.



Obrázek 4.1: Měření na univerzálním měřicím mikroskopu Carl Zeiss Jena 2650 s kontaktní sondou: (a) - kontaktní měřicí sonda, (b) - měřený předmět.

4.2.1 Bodová měření

Pojmem bodová měření lze chápat měřicí metody založené na technice postupného měření zkoumaného povrchu pomocí skenování v definovaných bodech. Na proměření celého zkoumaného povrchu (popř. jeho části) pak potřebujeme $n(t + t_t)$ celkový času, kde n je počet měřených bodů, t je čas potřebný na jedno měření a t_t je doba na změnu pozice pro měření dalšího bodu.

Laserové dálkoměry

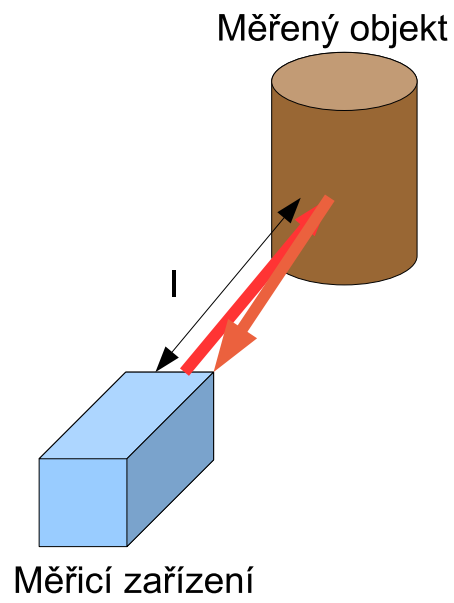
Jsou poměrně jednoduchá jednobodová zařízení, která slouží k měření vzdálenosti zkoumaného povrchu předmětu od referenční roviny. Využívají většinou koherentní záření, které se projektuje na měřený povrch. Měřicí systémy tohoto typu využívají tři principy vyhodnocení vzdálenosti: měřicí zařízení \rightarrow povrch předmětu [7].

A) Senzory využívající principu měření času průchodu záření prostředím

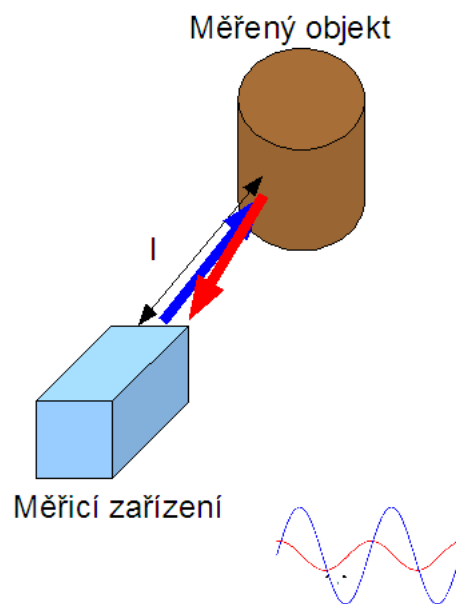
Zařízení založená na principu měření vzdálenosti pomocí času, které potřebuje světlo na uražení vzdálenosti ke zkoumanému předmětu a zpět k detektoru, jsou v praxi velice často využívána. Zdrojem je laserová dioda, která vysílá krátké světelné pulzy směrem ke zkoumanému předmětu. Dráha se vypočítá ze znalosti rychlosti šíření světla v měřeném prostředí a času průchodu světla od měřicího zařízení k předmětu a nazpět (viz obrázek 4.2). Tedy platí $l = vt/2$, kde l je měřená vzdálenost, v je rychlost šíření světla v měřeném prostředí a t je zmiňovaný čas. Zařízení tohoto typu pracuje nejčastěji ve statistickém módu, kdy měří sérii několika světelných pulzů a výsledek je zpracován pomocí statistických metod. Přesnost těchto zařízení je v intervalu $\langle 5 - 10 \rangle$ mm na 1m délky.

B) Laserové radary

V principu jsou velmi podobné předchozím zařízením. Využívají detekci modulovaného světelného záření. Detekuje se fázový rozdíl odraženého záření od předmětu a vlny pilotní - osvětlující povrch (viz obrázek 4.3). Výsledná délka se vypočítá pomocí vztahu $l = kn + \Delta\varphi$, kde k je celé číslo, n je modulovaná délka záření a $\Delta\varphi$ je fázový posun odražené vlny oproti pilotní.



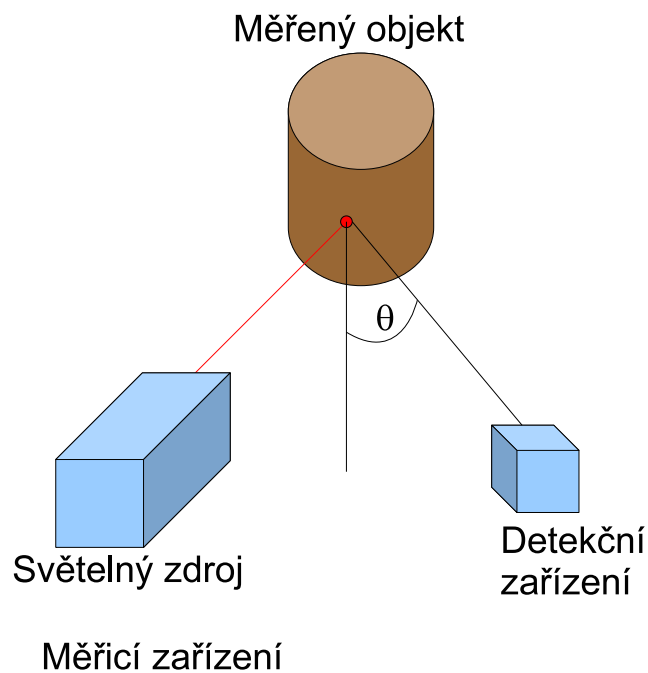
Obrázek 4.2: Měření vzdálenosti pomocí stanovení doby průchodu záření měřeným prostředím.



Obrázek 4.3: Měření vzdálenosti pomocí analýzy fázového posunu odraženého laserového záření od povrchu měřeného předmětu.

Triangulační dálkoměry

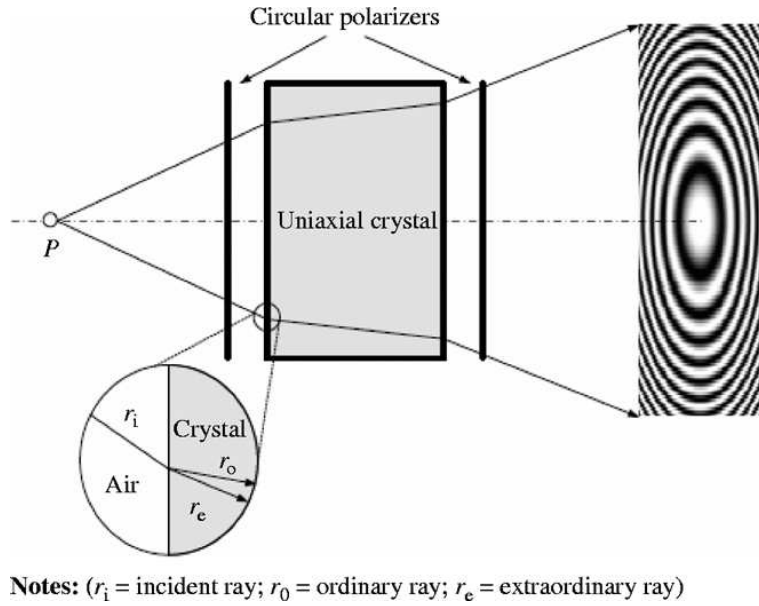
Zařízení tohoto typu využívají princip triangulace pro stanovení vzdálenosti měřeného bodu povrchu od referenční roviny (viz obrázek 4.4). Princip triangulační metody bude podrobně vysvětlen v kapitole 5. Vzdálenost bodu povrchu k referenční rovině je závislá na parametrech měřicí sestavy: $dl = g(f, L, \theta)$, kde f je ohnisková vzdálenost objektivu kamery, L je vzdálenost zdroje světla od referenční roviny a θ je úhel který svírá osa objektivu s pilotním svazkem.



Obrázek 4.4: Dálkoměr založený na triangulační metodě. θ) je tzv. triangulační úhel.

Konoskopická metoda

Konoskopická metoda (z anglického Conoscopy) patří do bodových měření, je jednoduchá na přístrojové vybavení. Vyhodnocení této metody je komplikovanější než u předešlých. Tato metoda je založená na interferenci dvou vln, jejichž zdrojem je světelný bod na povrchu měřeného předmětu. Sestava se skládá [8] ze skřížených polarizátorů, dvojlomného krystalu, optiky a detekčního zařízení (viz obrázek 4.5). Světelná vlnoplocha od bodu na povrchu dopadá na polarizátor. V krystalu se dělí na řádnou r_o a mimořádnou r_e vlnu ,



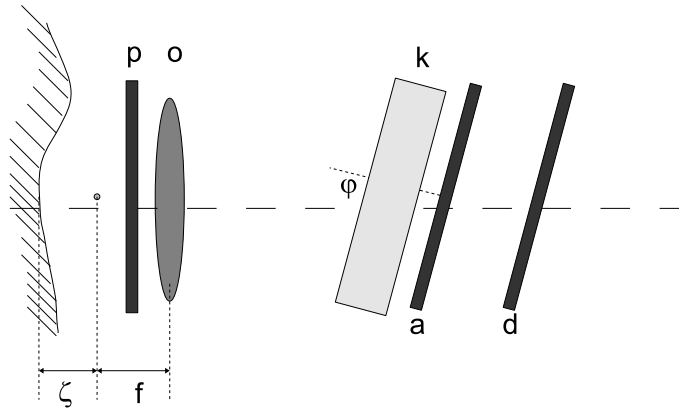
Obrázek 4.5: Konoskopie - měření vzdálenosti pomocí dvojlomného krystalu. r_o a r_e jsou řádné a mimořádné vlny, které poté interferují na CCD snímači [8].

kteří se šíří rozdílnou rychlostí v_o a v_e . Fázový rozdíl obou vln je dán použitým typem krystalu a jeho tloušťkou. Na výstupu krystalu je analyzátor a detekční zařízení. Obě vlny spolu interferují a vytvoří interferenční obrazec. V reálné sestavě se umístí před krystal optika, poté za nelineární krystal analyzátor a detektor, který se nakloní vůči optické ose o úhel φ . Při posunutí světelného zdroje o vzdálenost ζ dojde ke změně interferenčního obrazce. Vzdálenost ζ se potom vypočítá jako [9]:

$$\zeta = \frac{\lambda f^2}{2\Delta x LC(\varphi)}, \quad (4.1)$$

kde Δx je rozdíl interferenčních proužků, L je tloušťka krystalu, f ohnisková vzdálenost optické soustavy, λ vlnová délka použitého světla, $C(\varphi)$ je funkce popisující fázový rozdíl obou vln vzhledem k úhlu otočení (φ). Popis experimentu je znázorněn na obrázku 4.6.

Zmiňované měřicí metody dávají v daném okamžiku měření informaci (vzdálenost, topografickou výchylku) pouze o jednom bodu (malé oblasti) měřeného povrchu. Pokud chceme použít tyto metody k měření topografie celého objektu je nutné postupně proměřit (proskenovat) celý povrch v definovaných bodech. Je možné buď pohybovat měřicím systémem, nebo měřeným předmětem. Tento přístup je však náročný na čas i přístrojové vybavení a vnáší další nejistoty měření do systému, kde původně měření bylo zatíženo



Obrázek 4.6: Konoskopie - Princip měření. ζ je měřená vzdálenost, f parametr použité optiky, a - analyzátor, p - polarizátor, o - optika, k - krystal, d - detektor.

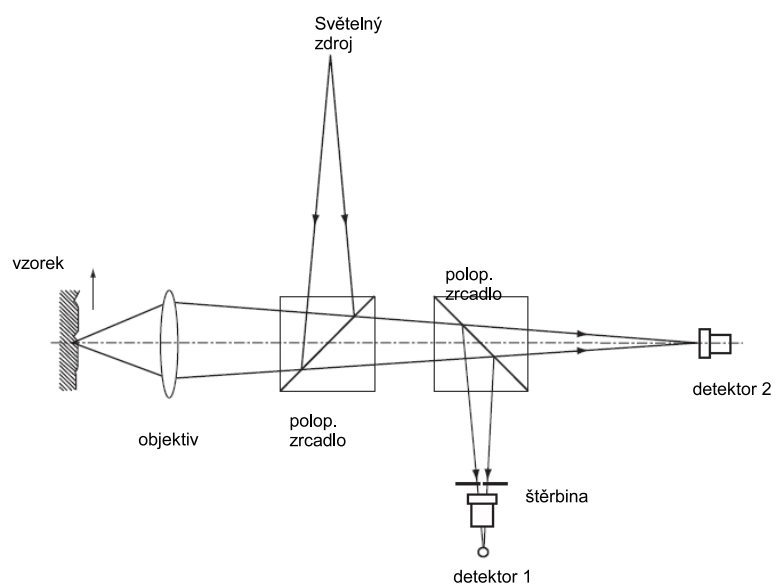
pouze chybou v měřeném směru např. osy z . Při skenování zanášíme do systému chyby lokalizace měřených bodů ve zbylých osách x, y .

Metoda založená na analýze intenzity světla

Tato metoda zkoumá intenzitu projektovaného světelného bodu na povrch zkoumaného předmětu a porovnává ho s bodem v referenční vzdálenosti z_d . Systém je tvořen světelným zdrojem, který je přes polopropustné zrcátko promítán pomocí optiky na povrch měřeného předmětu. Tento bod je zobrazen na dva detektory. Detektor 1 je velký plošný, který měří celkovou intenzitu bodu a detektor 2 je opatřen clonkou, která propustí pouze osové svazky. Pokud se bude měnit vzdálenost předmětu od objektivu k , bude se měnit intenzita na obou detektorech. Detektor 2 měří reflektivitu povrchu v daném bodě. Pokud budeme s předmětem posouvat, změní se pozice obrazu bodu na detektoru 1 dle vztahu [10]:

$$I_1 = \frac{s\Delta I_2 M^2 z}{2\pi r_0 d} + I_d, \quad (4.2)$$

kde δI_2 je rozdíl intenzit v referenční d a měřené vzdálenosti, r_0 je apertura objektivu a z je velikost štěrbin. Princip metody je zobrazen na obrázku 4.7



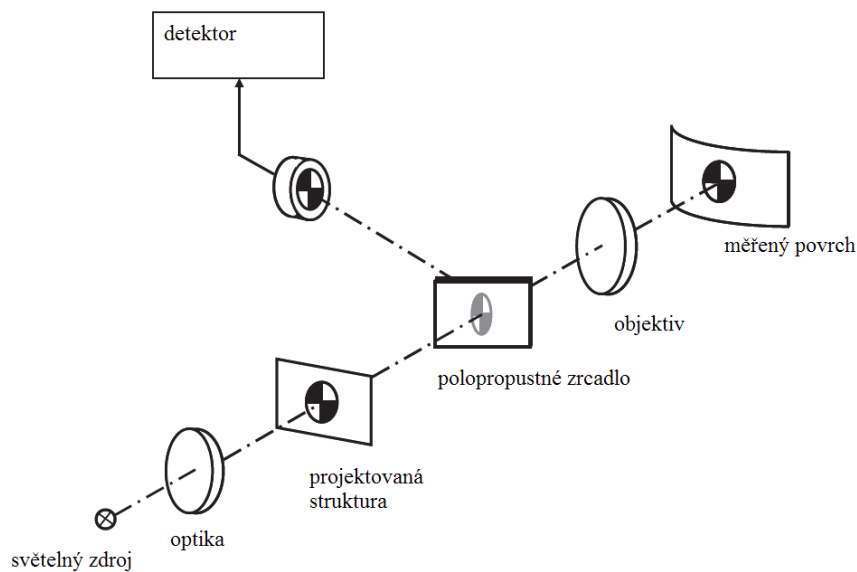
Obrázek 4.7: Měření vzdálenosti pomocí detekce změny intenzity světla měřeného bodu [10].

Metoda měření kontrastu

Tato metoda je zaměřená na zjišťování kontrastu projektované struktury na povrch měřeného předmětu. Jedná se o bodové měření povrchu předmětu. Na zkoumaný povrch je zobrazen specifický vzor, který je následně snímán detekčním zařízením a je vyhodnocován kontrast snímku. Na obrázku 4.8 je znázorněn princip měřicí metody. Pokud je povrch měřeného předmětu v obrazové rovině použité optické soustavy, má obraz projektovaného vzoru na detektoru maximální kontrast [11]. V ostatních případech se mění kontrast struktury. Kontrast struktury lze stanovit pomocí vztahu:

$$S = \frac{(I_1 + I_3) - (I_2 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (4.3)$$

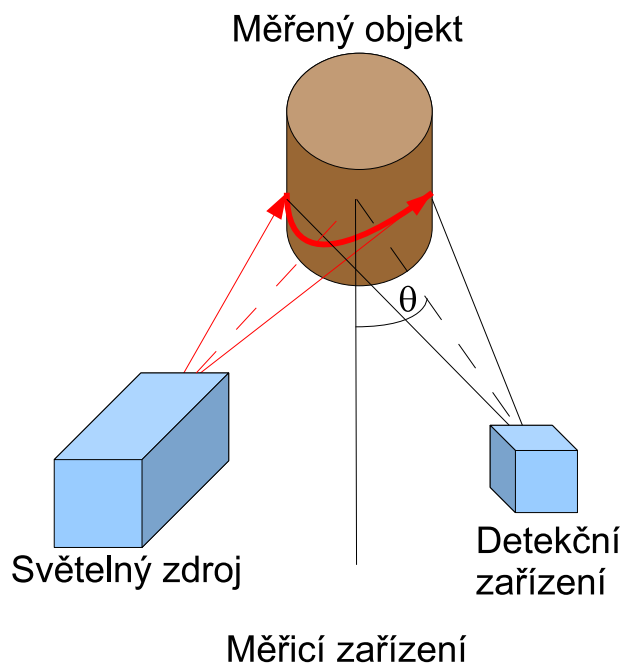
kde I_1, I_3 je intenzity světlých oblastí a I_2 a I_4 intenzity tmavých oblastí. Citlivost této metody je do $1\mu m$ v měřicím rozsahu $150mm$.



Obrázek 4.8: Měření vzdálenosti pomocí detekce kontrastu projektované struktury na povrch předmětu.

4.2.2 Profilovací měření

Tyto měřicí metody jsou založeny na principu měření jednotlivých profilů (řezů) zkoumaných předmětů v jednom okamžiku (viz obrázek 4.9). Předpokládejme, že zkoumaný povrch předmětu leží v rovině x, y a hledaná topografická výchylka je totožná s osou z . Oproti předchozím metodám mají tu výhodu, že se neměří bod po bodu, ale soubor n bodů je detekován v jeden okamžik. Je důležité, že počet n měřených bodů je závislý na rozlišení detekčního zařízení a je rovnoběžný např. s osou x . V dalším kroku je měřen další profil předmětu v předem definované vzdálenosti Δy . Dostáváme tedy matici bodů $3 \times m \times n$ s hodnotami souřadnic x, y, z , ze kterých je možné zrekonstruovat povrch měřeného předmětu v diskretních bodech. Rozlišení v ose y je dáno krokem posunu předmětu v ose y , popř. rozlišením měřicího zařízení. Rozlišení v ose z je dáno citlivostí měřicí metody. Typickým reprezentantem profilovacího měření je metoda 3D skenovací profilometrie, která je podrobně popsána v kapitole 5.



Obrázek 4.9: Princip profilovacího měření. V jednom časovém okamžiku se měří sada bodů v jednom profilu.

4.2.3 Plošná měření

Plošná měření využívají obecně optické záření, které může být koherentní i nekoherentní. Kapitola popisuje vybrané optické topografické metody dnes hojně využívané v praxi. Samozřejmě že existuje obrovské množství alternativních, většinou modifikovaných metod, které zde nejsou popisovány a závisí na konkrétní aplikaci.

Stereoskopická metoda

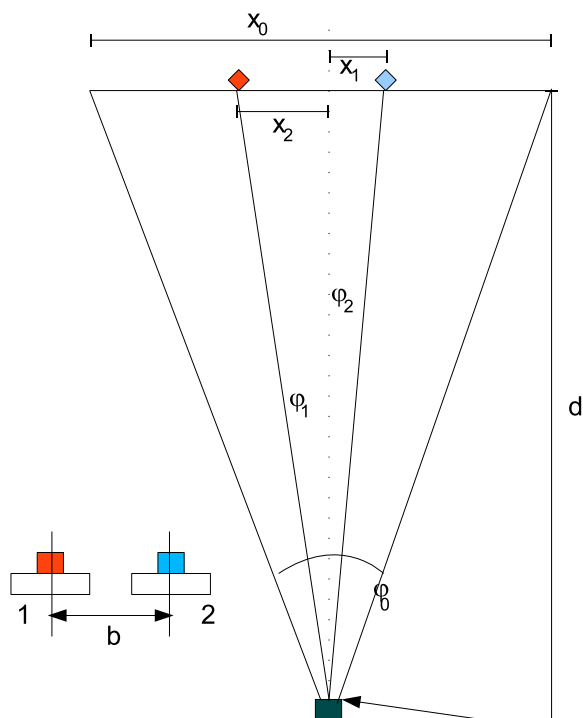
Tato metoda je velice stará. Již cca. 300 let p. n. l. Euklides popsal lidské vidění a použil principy stereoskopie, první zmínky a matematický popis jsou datovány do 19. století, poprvé použil stereoskopické zobrazení Sir Ch. Wheatstone v roce 1833 [12]. Princip metody se využíval a využívá k projekci 3D obrázků a snímků. Jedná se o vytváření iluze prostoru na 2D snímku pomocí rozposunutí dvou totožných snímků v jedné ose. Na totožném principu fungují dnešní 3D televizory a kina.

Měřicí metoda využívá záznamu pozorovaného předmětu nebo scény pomocí dvou totožných záznamových zařízení, nebo posunutí jednoho zařízení o definovaný úsek [13]. Dnes je stereoskopie hojně používána pro zmapování topografie zemského povrchu. V tomto případě je aplikováno pouze jedno záznamové zařízení, které se pohybuje nad terénem (pomocí letadla, nebo družice). Tato metoda je též používána pro topografické měření malých předmětů (řádově velikosti cm až několik desítek cm).

Mějme dva snímky téhož objektu (bodu), kde při tvorbě druhého snímku posuneme definovaně kamerou v směru jedné osy o daný úsek d . Na obrázku 4.10 je popsána geometrie obou snímků vzhledem ke kameře a jejímu posunutí. Na snímku lze vidět rozposunutí obou bodů o vzdálenosti x_1, x_2 vůči středu snímku, který má celkově x_0 pixelů. Vzdálenost od záznamového zařízení je d a úhly pod kterými jsou oba body pozorovány - φ_1 , resp φ_2 . Zorný úhel záznamového zařízení φ_0 je daný konstrukcí objektivu. Při výpočtu vzdálenosti d vycházíme z trigonometrie a můžeme použít vztahy:

$$\frac{x_1}{x_0/2} = \frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_0/2}, \quad (4.4)$$

$$\frac{-x_2}{x_0/2} = \frac{tg\varphi_2}{tg\varphi_0/2}, \quad (4.5)$$



Obrázek 4.10: Popis principu stereoskopické metody.

a vzdálenost d poté lze vyjádřit jako:

$$d = \frac{b \cdot x_0}{2tg(\varphi_0/2)(x_{1h} - x_{2h})}, \quad (4.6)$$

kde $(x_{1h} - x_{2h})$ je rozdíl obou bodů v horizontální rovině, což odpovídá posunu těchto bodů o vzdálenosti x_1 a x_2 , tedy rozdíl v n pixelech na kameře. Pro výpočet chyby měření je nutné vzít v potaz chybu určení úhlu odpovídající změně pozice o jeden pixel na kameře $\Delta\varphi = \frac{\varphi_0}{x_0}$. Výsledná chyba je pak daná vztahem:

$$\Delta d = \frac{d^2}{b} tg(\Delta\varphi). \quad (4.7)$$

Samotné měření topografie předmětu spočívá v rozpoznání shodných bodů na povrchu předmětu a dosazením rozdílů pozice těchto bodů do rovnice (4.6). Tento postup je však náročný na výpočet korelace jednotlivých bodů obrazu. V praxi (tam kde je to možné) se využívá značkování povrchu předmětu pomocí rozpoznatelných bodů. Separace jednotlivých bodů lze dosáhnout buď barevným odlišením, nebo časovým odlišením (vytváří se jednotlivé snímky s jednou značkou). Citlivost této metody je dána rozlišením záznamového zařízení a vzdáleností, ze které zkoumaný předmět pozorujeme.

Dalším přístupem vyhodnocení této metody je kalibrační postup. V tomto případě nevyužijeme vztahu (4.6), ale provedeme kalibraci měřicí sestavy pomocí referenčních rovin s referenčními body. Nevýhodou tohoto postupu je pracná a časově náročná prvotní kalibrace. Avšak výhodou je prakticky nulová závislost výsledku měření na vadách objektivu. Díky prvotní kalibraci je také zahrnut vliv optických vad objektivu do měření.

Metoda měření tvaru pomocí stínů

Již podle názvu (Shape from shading) se jedná o metodu, která k rekonstrukci tvaru povrchu používá analýzy intenzitního průběhu snímaného objektu. Přístrojové vybavení experimentu je velice jednoduché, tvoří ho pouze světelný zdroj a záznamové zařízení. Při analýze dat předpokládáme (a tím je také metoda omezena na určité povrchy), že povrch předmětu je Lambertovský [14].

Lambertovský (ideálně matný, ideálně difuzní) povrch je takový povrch, který odráží světlo do všech směrů stejně. Pokud tedy máme povrch, který odráží lambertovsky, známe směr osvitů a normálu k osvětlovanému povrchu, můžeme spočítat intenzitu odraženého světla pomocí vztahu:

$$I_r = L \cdot NI_l, \quad (4.8)$$

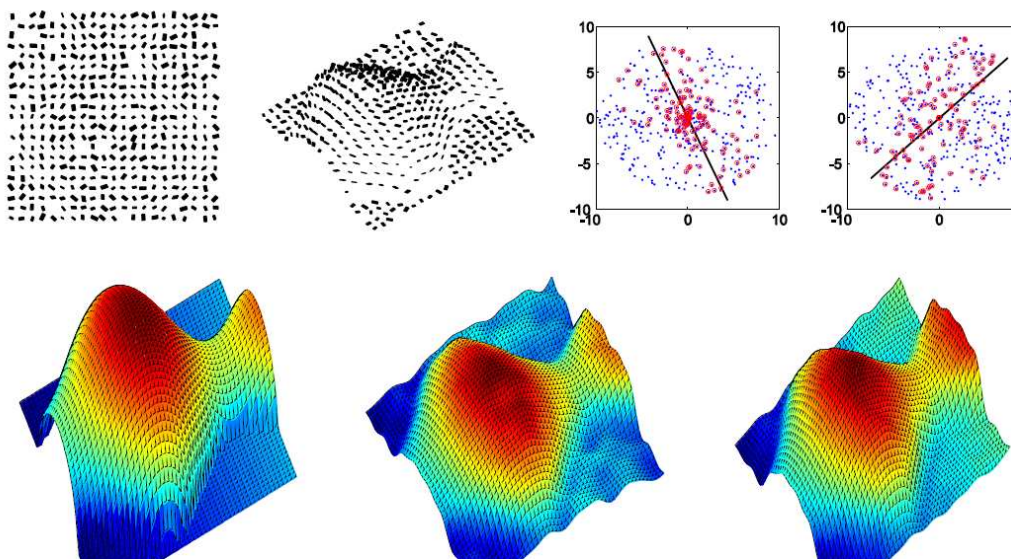
$$L \cdot N = |L| |N| \cos\alpha, \quad (4.9)$$

kde L je směr osvitů, N je normála k povrchu a α je úhel který svírají N a L . Největší hodnoty tedy intenzita dosáhne, pokud jsou oba směry totožné.

Princip vyhodnocení normály povrchu v daném bodě poté spočívá v analýze intenzity tohoto bodu.

Metoda měření tvaru pomocí textur

Princip metody (z anglického Shape from texture) je založen na analýze deformace obecné struktury nanesené na povrch zkoumaného předmětu [15]. Jestliže bude povrch rovinný a textura periodická, bude se obraz této struktury měnit pouze vlivem zobrazení (aberrace, zvětšení). Pokud však bude povrch předmětu s texturou deformován, dojde k deformaci této textury a výsledný obraz bude oproti původnímu stavu změněn (viz obrázek 4.11).



Obrázek 4.11: Změna textury v závislosti na podkladu, dochází k deformaci struktury. Analýzou deformace původní struktury je možné zrekonstruovat původní povrch [16].

Existuje několik přístupů pro vyhodnocení textury na povrchu zkoumaného předmětu. Jednotlivé body struktury jsou označovány jako texely (texture picture). Přístup popsany Gibsonem [17] zkoumá relativní velikost a polohu jednotlivých texelů v obraze. Využívá se diskretní Fourierovy transformace.

Fourierovská profilometrie

Touto metodou se budeme v našem výčtu zabývat podrobněji, jelikož je v dizertační práci použita pro srovnávací měření topografie kyčelních implantátů. Fourierovská profilometrie je někdy též nazývána F. topografie (v anglické literatuře též Fourier Transform Profilometry). Tato metoda byla poprvé publikovaná v roce 1982 [18]. Je založená (podobně jako metoda Moiré) na měření fázového rozdílu periodické struktury promítané na zkoumaný objekt a referenční rovinu. Rozdíl fází těchto struktur v měřených bodech charakterizuje jejich výškové rozložení. Ve srovnání s Moiré topografií [19] nebo 3D skenovací topografií je tato metoda jednoduchá z pohledu experimentálního vybavení a rychlejší v provedení měření. Nevýhodou je naopak složitější algoritmus výpočtu. Na rozdíl od 3D skenovací pro-

filometrie je potřeba použít pouze jeden snímek (3D skenovací profilometrie jich potřebuje řádově desítky), Moiré topografie obvykle vystačí se dvěma snímky, avšak její nevýhodou je fakt, že lze počítat s body jejichž rozdíl topografických výchylek je konstantní (jistého zlepšení lze dosáhnout metodou fringe shifting).

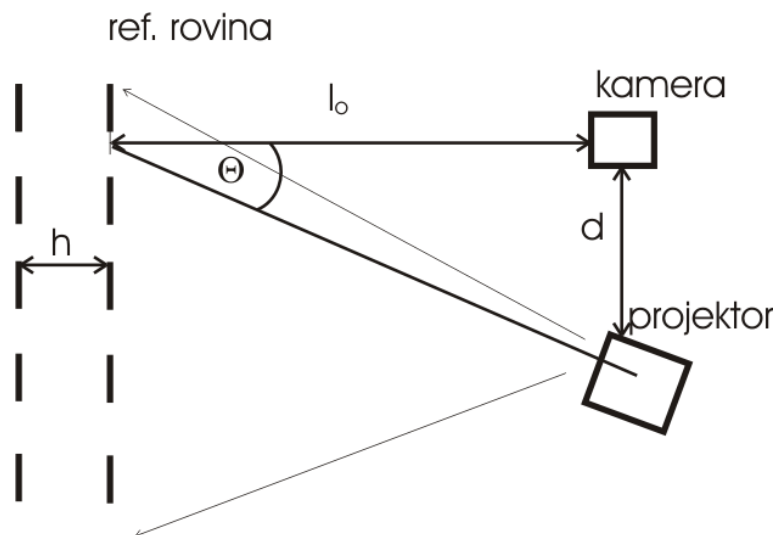
A) Princip metody

Metoda je založená na snímání periodické struktury projektované na povrch měřeného objektu a porovnání s tvarem téže struktury zaznamenané na referenčním objektu. Pokud tuto strukturu (uvažujme mřížku se sinusovým průběhem intenzity dopadajícího světla) promítneme na rovinu rovnoběžnou s rovinou projektoru, dostaneme na kameře opět periodický průběh intenzity (sinusový průběh obvykle zatížený šumem). Jestliže ale stejnou strukturu promítneme na předmět, jehož povrch nebude rovinný, dojde k deformaci této struktury (zahuštění, nebo zřídnutí projektované struktury v závislosti na výškovém profilu předmětu). Rozložení intenzity v rovině snímacího prvku $g(x, y)$ této struktury lze popsat takto [20]:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\Phi(x, y) + 2f_0\pi x], \quad (4.10)$$

$$g_0(x, y) = a_0(x, y) + b_0(x, y)\cos[\Phi_0(x, y) + 2f_0\pi x], \quad (4.11)$$

kde $g(x, y)$, resp. $g_0(x, y)$ je intenzita struktury na rovině, resp. na měřeném předmětu. Dojde ke změně fáze v některých bodech. Tato změna pak nese informaci o topografické výchylce v těchto bodech. Geometrické uspořádání experimentu je patrné z obrázku 4.12. Kamera je pro jednoduchost umístěna ve stejné vzdálenosti od referenční roviny jako projektor. Nejprve se nasnímá struktura na retenční rovině ve vzdálenosti l_0 od kamery. Poté se vloží do zorného pole kamery měřený objekt a vyfotí se struktura na jeho povrchu. Důležitá pro tento typ experimentu je kvalita povrchu objektu. Ideální jsou difúzně odrazné povrchy. V ostatních případech je nutné povrch upravovat, nebo provádět složité morfologické operace se snímky. Důležitá je také volba periodické struktury a projektoru. Jako optimální se jeví mřížka se sinusovým průběhem intenzity (kvůli pozdější filtraci). Je rovněž vhodné nastavit vysokou hodnotu kontrastu pro filtraci šumu a morfologické operace. S ohledem na tvar povrchu a typ aplikace je důležitá volba periody mřížky.



Obrázek 4.12: Geometrie Fourierovské profilometrie založené na detekci změny fáze periodické struktury.

B) Vyhodnocení experimentu

Pro samotné vyhodnocení experimentu je nutné nejprve kalibrovat sestavu (nasnímání periodické struktury na kalibračním předmětu). Tuto kalibraci je nutné provést pouze jednou a následně jen v případě změn v sestavě experimentu. Při měření se vloží na místo kalibračního předmětu měřený objekt a nasnímá se struktura na jeho povrchu. Následuje zpracování snímku v počítači. Rozložení intenzity se řídí vztahem (4.10) resp. (4.11). V rozložení intenzity lze najít jednak vlastní frekvenci mřížky, frekvence, které vzniknou deformací mřížky a potom další frekvence, jež nenesou relevantní informace (šum). Tyto frekvence je nutno odfiltrovat ze signálu. Proveďte se tedy Fourierova transformace a filtrace. Snímky můžeme zpracovávat jednak po řádcích, nebo po sloupcích. Tedy v osách x a y . Jednotlivé signály se upraví pomocí Fourierovy transformace (zde pro osu x):

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-2\pi i f x} dx, \quad (4.12)$$

$$G_0(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x, y) e^{-2\pi i f x} dx. \quad (4.13)$$

Po filtraci (odfiltrují se vysoké a parazitní frekvence) se provede zpětná Fourierova transformace a z těchto hodnot se vypočítají fáze referenčního a měřeného signálu v jednotlivých

bodech pomocí vztahu:

$$\Phi(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im} [\widehat{g}(x, y)]}{\operatorname{Re} [\widehat{g}(x, y)]} \right], \quad (4.14)$$

$$\Phi_0(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im} [\widehat{g}_0(x, y)]}{\operatorname{Re} [\widehat{g}_0(x, y)]} \right], \quad (4.15)$$

Můžeme tedy jednoduše vypočítat rozdíl fází obou signálů v každém bodě obrázku. Při výpočtu je nutné přepočítávat fázi. Jelikož podle tohoto výrazu by fáze byla v intervalu $0 \div 2\pi$ je nutné ji přepočítat. K tomuto slouží operace unwrapping.

Po této úpravě můžeme převést změnu fáze $\Delta\Phi(x, y)$ na topografickou výchylku pomocí vztahu:

$$h(x, y) = \left[\frac{l_0 p_0 \left[\frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right]}{\left\{ p_0 \left[\frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right] - d \right\}} \right], \quad (4.16)$$

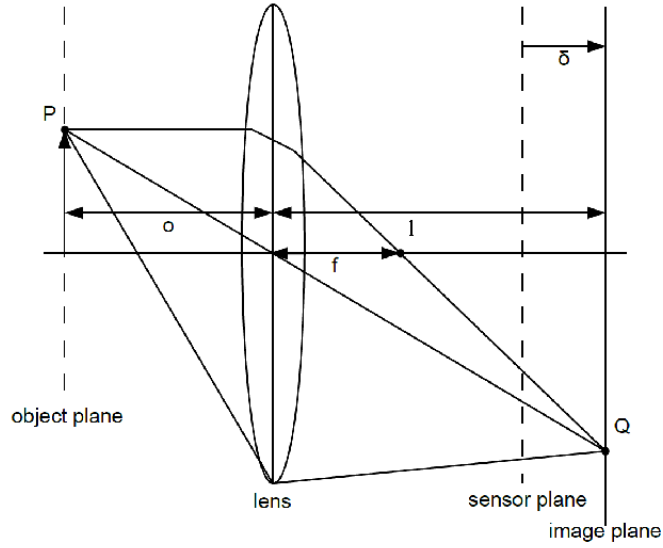
kde d je vzdálenost mezi kamerou a projektorem, p_0 je perioda mřížky dělená výrazem $\cos\theta$, l_0 je vzdálenost referenční roviny od roviny pozorování. $\Delta\Phi(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_0(x, y)$ je rozdíl fází referenčního snímku a snímku měřeného předmětu v daném bodě (x, y) .

Metoda měření tvaru předmětu pomocí ostření/rozostření obrazu

Povrch předmětu lze také měřit pomocí analýzy ostrosti snímané scény (metoda je anglicky označována jako Shape from focus/defocus). Princip je podobný jako při měření pomocí konfokálního mikroskopu. Rozdíl je však v rozsahu a citlivosti metody. U konfokálního mikroskopu se pohybuje rozlišení v řádech nm . U použití metody shape from focus je rozlišení v řádech μm . Principiálně se tedy jedná o analýzu ostrosti snímané scény v jednotlivých bodech snímku. Zobrazení bodu optickou sestavou je vysvětleno na obrázku 4.13. Vzdálenost o bodu lze vypočítat s pomocí parametrů čočky f a vzdálenosti l jako [21]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{l}, \quad (4.17)$$

v tomto případě nebude zobrazený bod fokusovaný do *bodu* na detektoru, ale bude odpovídat plošce, jejíž obsah se bude měnit se vzdáleností l . V okamžiku, kdy $\delta = 0$, bude mít tento bod minimální plochu na detektoru. V tomto případě usoudíme vzdálenosti s topografickou hloubku o . Principiálně se tedy hledají v obraze kontrastní body a ty se dále analyzují. Měření může probíhat dvojím způsobem:



Obrázek 4.13: Zobrazení bodu jednoduchou čočkou, vysvětlení měření pomocí metody vyhodnocující ostrost scény [21].

- Pohybujeme s detekčním zařízením ve směru normály k povrchu.
- Pohybujeme s předmětem ve stejném směru.

Vyhodnocení probíhá tak, že v okolí zkoumaného bodu vyhodnocujeme matici bodů o velikosti $m \times m$ a zjišťujeme minimum plochy daného bodu ve vztahu k jeho intenzitě. Využijeme Laplaceův filtr pro intenzitu v okolí měřeného bodu v rovině detektoru x, y . Vzhledem k možnosti záporné druhé derivace se používá absolutní hodnota derivací.

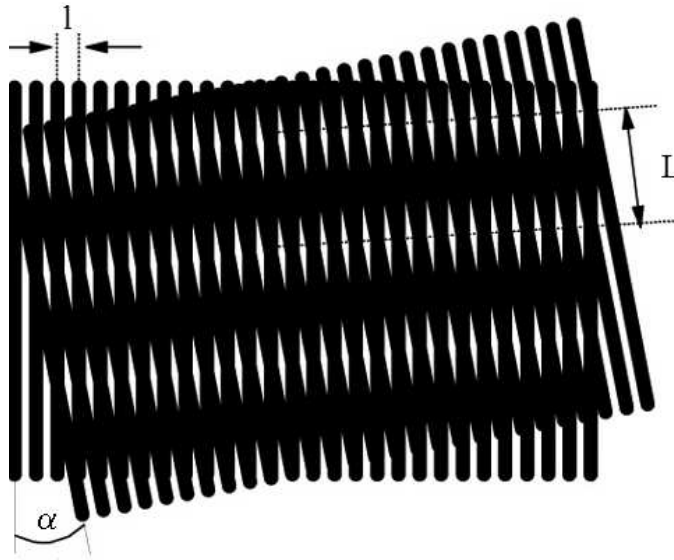
$$\Delta_{ML}^2 I = \left| \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right| \quad (4.18)$$

Sleduje se průběh intenzity v měřeném bodě, vzhledem k měnící se vzdálenosti povrchu o , který by měl mít gaussovský průběh se změnou vzdálenosti ve směru normály. Maximum odpovídá optimální fokusaci a topografické výchylce o .

Postup při defokusačním měření je principiálně podobný [22]. Měníme ohniskovou vzdálenost zobrazovací sestavy a opět vyhodnocujeme naměřená data ve zvolených bodech. Místa s nejlepší fokusací odpovídají určité ohniskové vzdálenosti objektivu, kterou lze přepočítat na topografickou výchylku o , popř. lze celý systém nakalibrovat.

Moiré metody

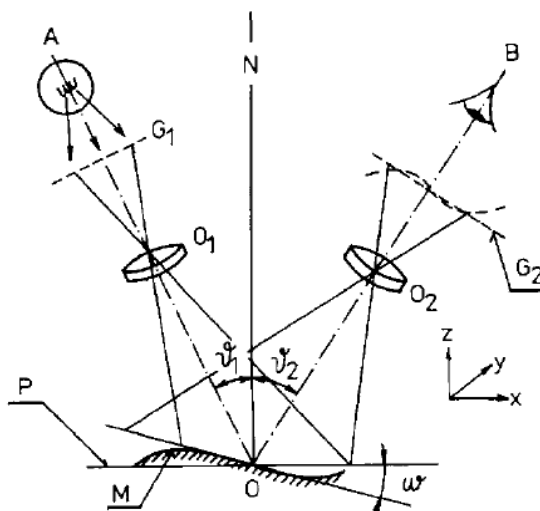
Moiré metody jsou založeny na principu projekce dvou pravidelných struktur na měřený povrch. Pravidelnou strukturou mohou být lineární mřížky, radiální mřížky, matice bodů apod. Obecně koincidence těchto dvou struktur vyvolá vznik třetí struktury pozorovatelné na povrchu měřeného předmětu [23]. Jedná se o superpozici dvou mřížek s mřížkovou konstantou l . Pokud jsou projektovány paralelně na sebe, nedochází ke vzniku další struktury. Pokud však natočíme jednu, nebo obě mřížky vůči sobě o úhel α , vznikne další struktura s periodou L (viz. obrázek 4.14):



Obrázek 4.14: Vznik moiré proužků. l , L jsou periody mřížek, α je úhel natočení jedné z mřížek.

$$L = \frac{l}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (4.19)$$

Pro malé úhly α je $L = l/\alpha$. Pokud promítneme jednu z mřížek na zkoumaný povrch dojde vlivem tvaru povrchu k deformaci této mřížky. Po superpozici s druhou mřížkou, která bude nedeformovaná - referenční, dojde ke generaci moiré proužků. Pro výpočet topografické výchyly z použijeme obrázek 4.15. Platí vztah:



Obrázek 4.15: Výpočet parametru z v bodě měření O pomocí parametrů ϑ_1 , ϑ_2 , ϖ . [23].

$$\Delta z = k \frac{L_{def}}{L}, \quad (4.20)$$

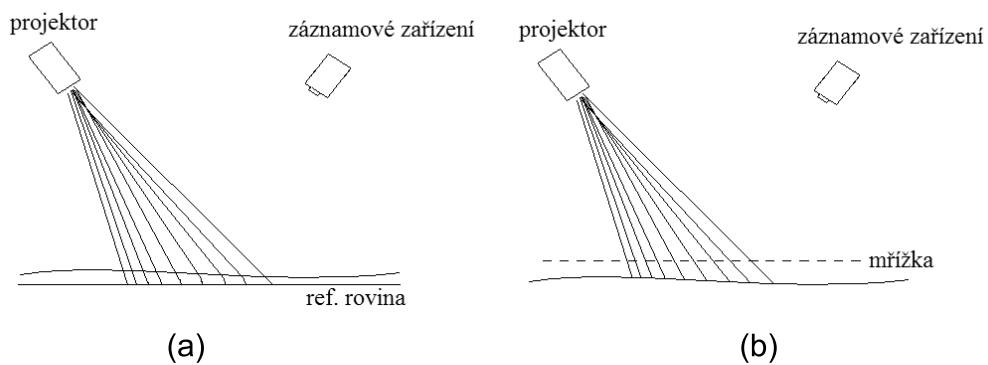
$$k = m \cdot l \frac{1 + tg\varpi tg\vartheta_2 \cos \varphi}{tg\vartheta_2 + tg\vartheta_1}, \quad (4.21)$$

kde k je odklonění moiré proužků, m je zvětšení optické soustavy, ϑ_1 , ϑ_2 jsou úhly projekce a pozorování, ϖ je úhel, který svírá zkoumaná rovina M s rovinou projekce P a úhel φ je úhel, který svírá normála NO s rovinou AOB , L_{def} je velikost deformace proužku. V praxi většinou volíme $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta_1/2$, ϖ a φ velice malé, potom se vztah (4.20) zjednoduší na:

$$\Delta z = \frac{L \cdot m \cdot L_{def}}{l^2 tg\vartheta/2}. \quad (4.22)$$

Citlivost měření Moiré metody se dá zvětšit pomocí "phase shifting" metody, kdy se posouvá fáze projektované mřížky, a také hustotou mřížky. Metoda je náročná na zpracování. Je nutné extrahovat z výsledného snímku Moiré proužky, jejichž detekce je velice obtížná. Jistou výhodou je počítačové zpracování, kdy se nejprve nasnímá referenční mřížka, vypočítá se její frekvence a fáze v obraze. Poté se nasnímá obraz projektované mřížky, zpracuje se obdobně a výsledek se sečte v paměti počítače. Tato metoda se nazývá "projekční moiré". Obdobně se postupuje při použití modifikace této metody tzv. "dvou-

projektorová (double projection) moiré". Struktury se projektují ze dvou směrů, popř. dvou projektorů. Dalším přístupem je umístění mřížky před zkoumaný povrch. Světlo procházející touto mřížkou je projektováno na povrch předmětu. Ten je snímán pomocí záznamového zařízení přes tutěz mřížku. Tato metoda je nazývána "stínová (shadow) moiré". Rozdíl obou metod je demonstrován na obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: Srovnání projekční moiré (a) a stínové moiré(b).

Kapitola 5

Teorie 3D skenovací profilometrie

V této kapitole je podrobně rozebrána bezkontaktní optická topografická metoda 3D skenovací profilometrie použitá v této dizertační práci při měření velikosti otěru náhrad kyčelních kloubů. Jsou popsány dva přístupy vyhodnocení naměřených dat. Dále je rozebrána citlivost a chyba metody.

3D skenovací profilometrie je bezkontaktní optická topografická metoda, pomocí které je možné získat informace o topografii povrchu měřeného předmětu. Princip metody je založen na přepočtu změny polohy proužku (laserové stopy projektované na zkoumaný povrch) vlivem změny polohy Δr zkoumaného povrchu vzhledem k uživatelsky definovaným referenčním rovinám určených buď výpočtem, nebo kalibrací [24]. Jak vyplývá z definice je možné postupovat při analýze výsledků této metody dvojím způsobem:

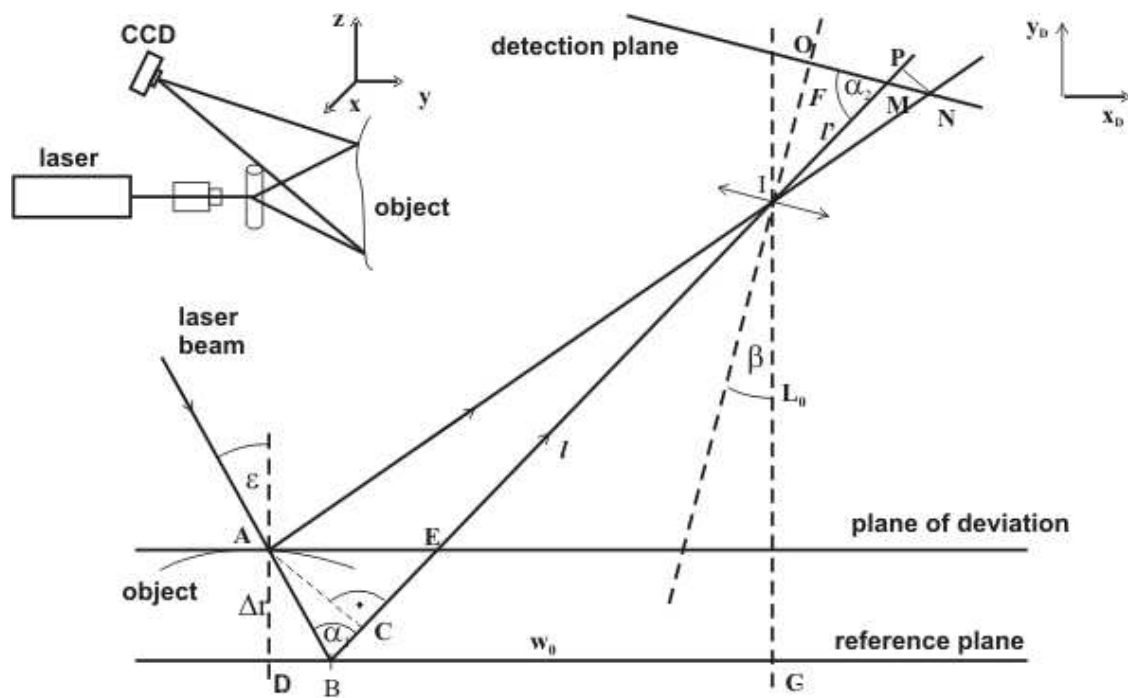
1. Výpočetní přístup.
2. Kalibrační přístup.

V dalším textu budou popsány oba přístupy a budou mezi sebou podrobně porovnány.

5.1 Výpočetní přístup

Geometrické uspořádání optické 3D skenovací profilometrie je zobrazeno na obrázku 5.1.

Světelný koherentní (resp. nekoherentní) svazek ze zdroje prochází optickou soustavou tvořenou clonkou a válcovou čočkou. Tato optická soustava upraví světelný paprsek na



Obrázek 5.1: Základní geometrie 3D skenovací profilometrie.

tenký světelný proužek, který je zaostřen na tangenciální rovinu blízké rovině referenční, ke které je vztažený povrch zkoumaného předmětu. Pro výpočet pozice bodu v rovině z musíme znát pozici tohoto bodu v rovině snímáče x_D, y_D . Pro výpočet použijeme tzv. mapovací algoritmus který popisuje A. Asundi [25]. Budeme se držet situace ilustrované na obrázku 5.1. Bod B je bodem průniku projektované stopy s referenční rovinou. Tento bod se promítne v detekční rovině kamery v bodě M . Kamera je umístěna ve vzdálenosti $L_0 = \overline{IG}$ od referenční roviny a ve vzdálenosti $w_0 = \overline{BG}$ od bodu B . Úhel β je úhel svírající optická osa kamery s normálou referenční plochy. Při měření reálného předmětu protíná projektovaná struktura jeho povrch v bodě A , který se zobrazí v detekční rovině kamery v bodě N . Vzdálenost mezi body M a N : $\Delta u = \overline{MN}$ je úměrná vzdálenosti $\Delta r = \overline{AD}$, která je hledanou topografickou hloubkou, tedy souřadnicí povrchu v ose z vzhledem k referenční rovině. Budeme vycházet z podobnosti trojúhelníků ΔAIC a ΔNIP (viz obrázek 5.1):

$$\frac{l - \Delta r \cos \alpha_1 / \cos \epsilon}{\delta r \sin \alpha_1 / \cos \epsilon} = \frac{l' + \Delta u \cos \alpha_2}{\Delta u \sin \alpha_2}, \quad (5.1)$$

$$a(z) = \frac{\sin \alpha_1 (\cot g \alpha_1 + \cot g \alpha_2)}{l \cos \epsilon} [1/mm], \quad (5.2)$$

$$b(z) = \frac{l' \sin \alpha_1}{l \cos \epsilon \sin \alpha_2} [-], \quad (5.3)$$

kde parametry a a b jsou vypočítány pomocí parametrů $\epsilon, \alpha_1, \alpha_2, l, l'$ a mohou být získány z kalibrace. Poté můžeme psát pro Δr výraz:

$$\frac{1}{\Delta r} = a(z) + \frac{b(z)}{\Delta u}. \quad (5.4)$$

Velikost Δu je dána počtem pixelů na měřicí kameře. Parametr b má pak rozměr $[pix/mm]$. Rovnici (5.4) tedy můžeme vyjádřit následovně:

$$\Delta r = \frac{\Delta u}{b + a \Delta u} \quad (5.5)$$

a s využitím McLaurenova rozvoje můžeme dále vyjádřit vztah (5.5) jako:

$$\Delta r \approx \frac{1}{b} \Delta u - \frac{a}{b} (\Delta u)^2 = \frac{\Delta u}{b} (1 - a \Delta u) \quad (5.6)$$

nebo

$$\Delta r = c_1 \Delta u - c_2 (\Delta u)^2. \quad (5.7)$$

Koeficienty c_1, c_2 jsou dány vztahem $c_1 = \frac{1}{b}, c_2 = \frac{a}{b}$. Vztah pro výpočet Δr bude lineární, což zjednoduší celkovou situaci.

5.1.1 Citlivost a chyba metody

S využitím rovnice (5.5) vypočítáme minimální posun projektované struktury v ose z [26]. Předpokládejme tedy, že se změna topografické výchytky c a obraz bodu B posune v rovině zobrazení do bodu N , který odpovídá změně o jeden pixel p_s . Nahradíme v této rovnici parametry $\Delta r = c$ (c budeme dále analyzovat se zřetelem na jeho nejmenší hodnotu

a budeme ho uvažovat jako citlivost metody) a $\Delta u = p_s$. S využitím předchozích vztahů můžeme psát:

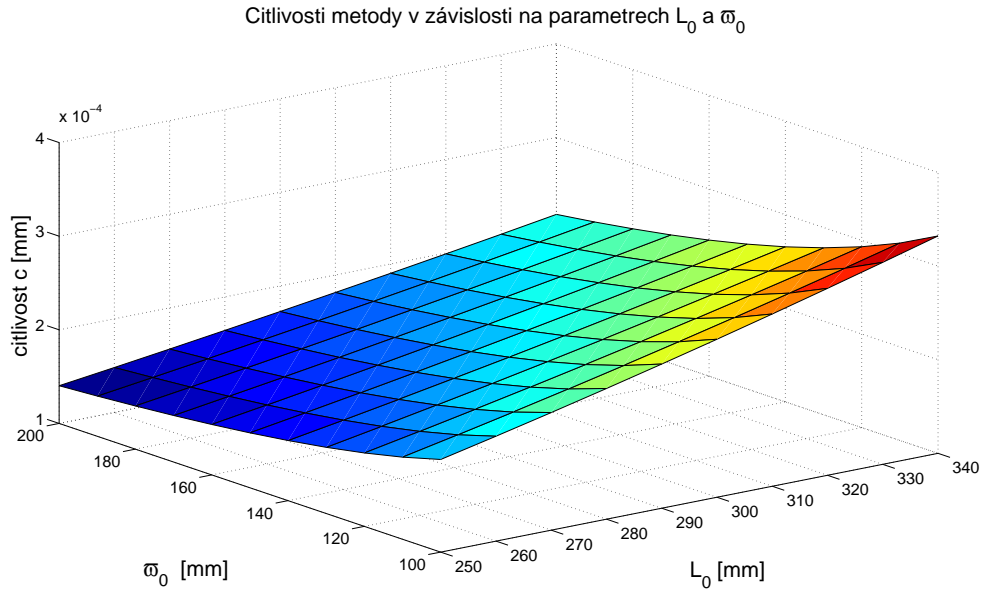
$$c = \frac{l \cos \epsilon \sin \alpha p_s}{l' \sin \alpha_1 + \sin(\alpha_1 + \alpha_2) p_s}. \quad (5.8)$$

S použitím parametrů a, b , dostaneme jednodušší vyjádření vztahu: $c = \frac{1}{a+b}$. S využitím parametrů sestavy můžeme celkovou citlivost měřicí sestavy popsat vztahem:

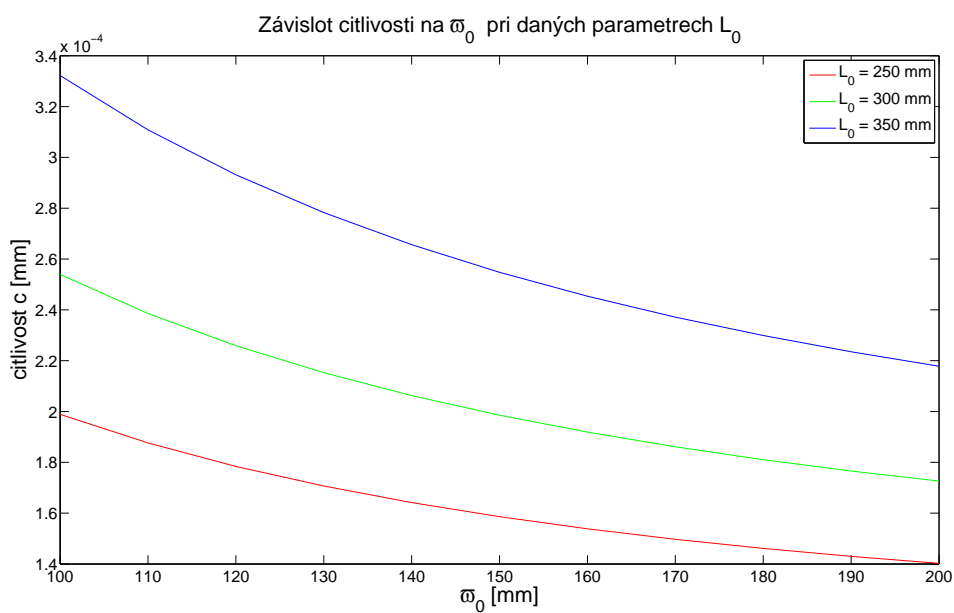
$$c = \frac{p_s \sqrt{L_0^2 + \varpi_0^2} \cos \epsilon \sin(\beta + \Theta_2)}{F \frac{\sin(\epsilon + \Theta_1)}{\sin(\beta + \Theta_2)} - p_s \cos \epsilon}, \quad (5.9)$$

kde $\Theta_1 = \arctg \frac{\varpi_0^2}{L_0^2}$, resp. $\Theta_2 = \arctg \frac{L_0^2}{\varpi_0^2}$.

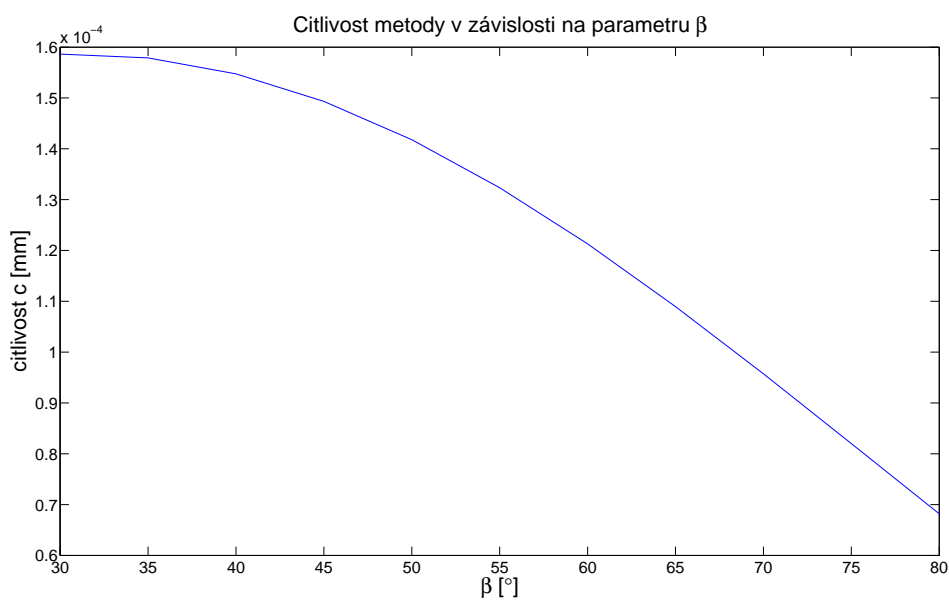
S rostoucí vzdáleností L_0 a ϖ_0 roste citlivost metody c a tím klesá rozlišení sestavy. Na obrázcích 5.2 - 5.4 jsou vykresleny grafy citlivosti vzhledem k vybraným parametrům sestavy. Je patrný pokles citlivosti směrem k menším vzdálenostem L_0, ϖ_0 a rostoucímu β . Rozlišení kamery je bráno z reálného rozlišení námi používané kamery Lumenera Lu120, které činí: $p_s = 7 \mu m$.



Obrázek 5.2: Citlivost metody v závislosti na parametrech L_0, ϖ_0 . S rostoucími vzdálenostmi L_0 roste hodnota citlivosti (rozlišení se zvětšuje) metody.



Obrázek 5.3: Citlivost metody v závislosti na parametru ϖ_0 (pro zvolené hodnoty L_0). S rostoucí ϖ_0 se zmenšuje parametr citlivosti (rozlišení sestavy se zmenšuje) metody.



Obrázek 5.4: S rostoucím úhlem β roste rozlišení sestavy - zmenšuje se minimální detekovatelný krok metody.

5.1.2 Chyby měření

Pro výpočet střední kvadratické chyby měření využijeme vztahu (5.7), který zderivujeme [26]:

$$\delta(\Delta r) = |(c_1 - 2c_2\Delta u)| \delta(\Delta u) + |(\Delta u)| \delta c_1 + (\Delta u)^2 \delta c_2. \quad (5.10)$$

Roztyl hodnot Δu je potom:

$$s_{\Delta u}^2 = \frac{(x_{Di} - u)^T H^{-1} (x_{Di} - u)}{n' - 1}, \quad (5.11)$$

kde H je diagonální matice a $H_{ii} = h(x_i) / \sum(x_i)$ a n' je počet nenulových elementů v řádku této matice. Potom platí: $\delta(\Delta u) = \sqrt{s_{\Delta u}^2}$. koeficienty c_1, c_2 je možné stanovit pomocí regresní analýzy z kalibračních dat měřicí sestavy. Z naměřených n párů dat $\Delta u, \Delta r$ je možné sestavit kovarianční matici:

$$S_c = \frac{1}{n - 2} (U^T U)^{-1} \sum_{i=1}^n (\Delta r_i - \overline{\Delta r_i})^2, \quad (5.12)$$

kde S_c je matice typu 2×2 , U je matice $n \times 2$ z hodnot $\Delta u, (\Delta u)^2$. Pro parametry c_1, c_2 platí: $\delta c_1 = \sqrt{S_{c11}}$, $\delta c_2 = \sqrt{S_{c22}}$. Při experimentálním měření s následujícími parametry $\Delta u = 50\text{pix}$, $c_1 = 0,410\text{mm}/\text{pix}$, $c_2 = 0,000010\text{mm}/\text{pix}^2$, $\delta(\Delta u) = 0,642\text{pix}$, $\delta c_1 = 0,0021\text{mm}/\text{pix}$, $\delta c_2 = 0,0000043\text{mm}/\text{pix}^2$ byla spočítána chyba měření $\delta(\Delta r) = 0,0475\text{mm}$ s citlivostí metody $c = 0,410\text{mm}$.

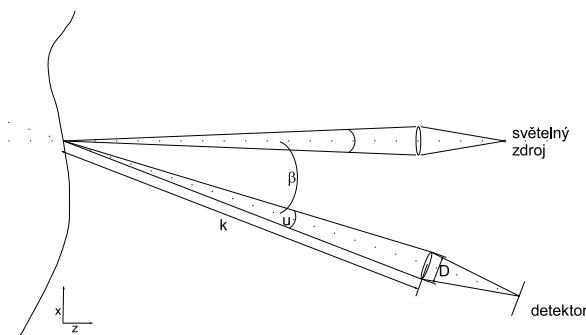
Tento postup však nepostihuje vady optiky, které vnesou do celého měřicího systému chyby. Tyto chyby je nutné kompenzovat při výpočtu. Nejmenší optické vady standardních objektivů jsou v blízkosti jejich optické osy. Jak bylo vysvětleno v předchozím textu, je nutné volit pro vyšší rozlišení měřicí metody menší vzdálenosti L_0, ϖ_0 a větší β . Což znamená, že se využije prakticky celý fotocitlivý prvek měřicí kamery. V okrajových částech zorného pole dojde vlivem optických aberací k posunu obrazu detekované struktury, který zanechá chybu do výsledku. Proto je nutné tuto chybu kompenzovat při výpočetním přístupu.

5.1.3 Vliv tvaru a vlastnosti projektované struktury na chybu metody

Podstatný vliv na přesnost výpočtu bude mít lokalizace projektované struktury na povrchu předmětu. S rostoucí velikostí vstupní apertury se zvětšuje rozlišení zobrazovací soustavy a obraz bodu bude mít tvar Airyho disku, který souvisí s difrakčním limitem soustavy. S omezováním velikosti vstupní apertury klesá rozlišení optické soustavy a u částečně koherentního a koherentního světla se začne projevovat vliv speklu (korenetní zrnitosti) [27] v obrazu bodu. Spekl bude ovlivňovat lokalizaci bodu a vyhodnocení topografické výchytky pomocí triangulačního algoritmu. Situace je patrná z obrázku 5.5.

Předpokládejme zjednodušeně že $\Delta r = \frac{\Delta x}{\sin\beta}$, kde Δx je chyba lokalizace projektované stopy na povrchu předmětu v rovině X, Y a β je úhel pozorování / osvitu (triangulační úhel). Chyba lokalizace bodu je dána vztahem [28]:

$$\text{var}(x) = \langle (x)^2 \rangle - \langle (x) \rangle^2. \quad (5.13)$$



Obrázek 5.5: Geometrie triangulační metody - popis vlivu speklu na chybu měření.

Budeme uvažovat koherentní světlo a potom pozice bodu v rovině X, Y se dá vyjádřit vztahem:

$$x = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) x dy dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dy dx}. \quad (5.14)$$

Předpokládejme že střední intenzita v daném bodě je dána $\langle I \rangle$ s využitím koherenčního koeficientu μ a dosazením parametrů experimentální sestavy se vztah pro výpočet chyby lokalizace bodu zjednoduší na:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{\sin u} \right)^2, \quad (5.15)$$

nejistota je pak dána vztahem:

$$\delta x = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{\sin u}, \quad (5.16)$$

kde λ je vlnová délka světla zdroje, u numerická apertura pozorovaného obrazu a je dán vztahem D/k , kde D je průměr objektivu a k je vzdálenost od pozorovaného bodu.

Výsledná chyba určení topografické výchytky je dána vztahem:

$$\delta r = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{\sin u} \frac{1}{\sin \beta}. \quad (5.17)$$

U částečně koherentního světla bude situace podobná, zavedeme navíc do výpočtu koherenční koeficient $C = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle}}$. Dosazením do vztahu (5.14) a výpočtem dostaneme vztahy pro δx a δr :

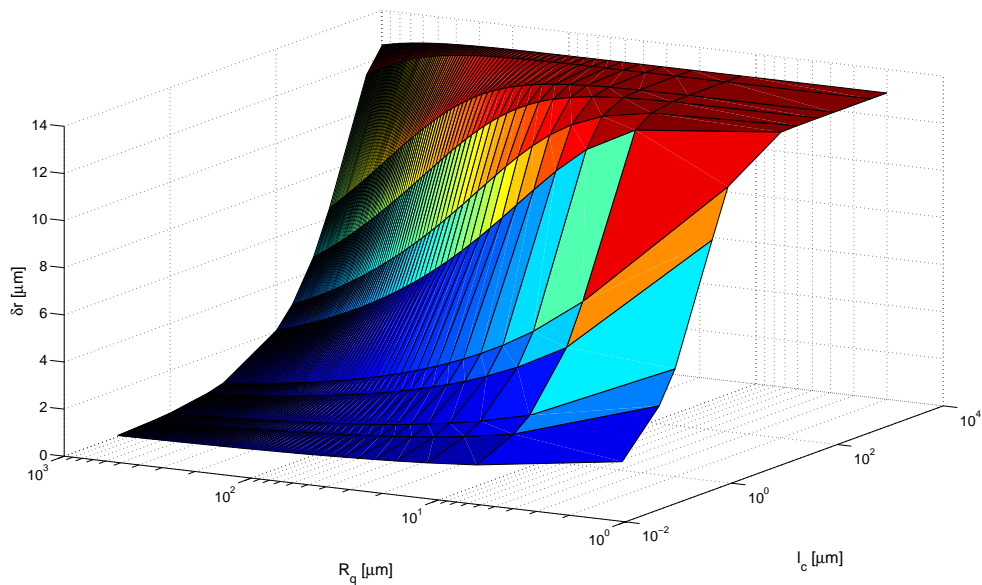
$$\delta x = C \frac{1}{2\pi} \frac{\bar{\lambda}}{\sin u}, \quad (5.18)$$

$$\delta r = C \frac{1}{2\pi} \frac{\bar{\lambda}}{\sin u} \frac{1}{\sin \beta}, \quad (5.19)$$

kde $\bar{\lambda}$ je střední vlnové délka světla. Pro případ, kdy $C = 1$, dostáváme nejistotu výpočtu pro koherentní světlo. Koherenční koeficient C lze vyjádřit pomocí koherenční délky použitého světla a drsnosti povrchu, na který je toto světlo promítáno následovně:

$$C^2 = \frac{1}{\sqrt{1 + (4R_q/l_c)^2}}, \quad (5.20)$$

kde R_q je střední kvadratická drsnost povrchu a l_c je koherenční délka světla. Pokud chceme zmenšovat parametr δr musíme buď snižovat koherenci světla, nebo zvětšovat pozorovací úhel, popř. zvětšovat triangulační úhel. V prvním případě se začne zvětšovat velikost stopy projektované na povrch předmětu v závislosti na rostoucí velikosti zdroje a tím dochází ke zvětšení měřené oblasti. Výsledná hodnota topografické výchytky bude tedy průměrem v dané oblasti. Nejmenší velikost bodu při použití fokusační optiky má laserový



Obrázek 5.6: Závislost chyby měření na parametrech l_c a R_q . S rostoucími hodnotami těchto parametrů roste chyba měření.

zdroj s největší hodnotou C . V druhém případě při zvětšování pozorovacího úhlu budeme zavádět chybu zobrazovací soustavy do výsledku (optika bude větší a složitější, kratší ohniska, větší vstupní apertury). V posledním případě může docházet až k zastínění bodů vlivem nerovnosti měřeného povrchu. Na obrázku 5.6 je graf závislosti chyby měření na zvolených parametrech koherenční délky l_c a drsnosti povrchu R_q , je patrné, že s rostoucí koherencí a drsností povrchu se projeví vliv speklu a nejistota lokalizace bodu na ploše se zvýší, tím poroste i δr . Tato chyba odpovídá limitní chybě, kterou jsme schopni teoreticky dosáhnout, v praxi však nemáme technické prostředky pro měření rozlišení δx v řádu μm , proto výsledná chyba je vždy větší.

5.1.4 Kompenzace optických vad měřicí sestavy

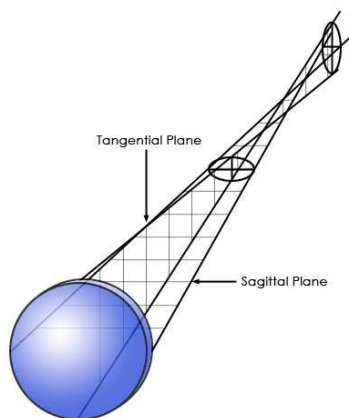
Základní aberace objektivů měřicích kamer lze shrnout do seznamu [29]:

1. astigmatická aberace ,
2. koma ,
3. sférické aberace ,

4. zkreslení pole ,
5. chromatická aberace ,
6. vinětace ,
7. reflexe .

Aberace typu 5, 6 a 7 nebudeme uvažovat, jelikož se při měření používá pouze monochromatické světlo, změna intenzity v zorném poli není kritická pro vyhodnocení pozice struktury, reflexe reprezentují pouze 4-8 % celkového dopadajícího světla (odstraní se pomocí obrazové analýzy).

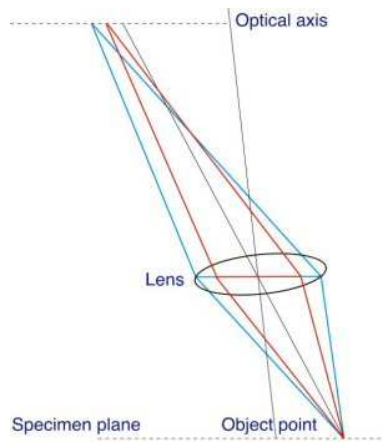
Vada č. 1 způsobuje, že paprsky ve dvou navzájem kolmých rovinách se protnou v různých bodech (viz obrázek 5.7). Astigmatismus také způsobuje rozdílné zobrazení, pokud paprsek dopadá na optickou soustavu kolmo nebo pod úhlem [30]. Vzdálenost mezi těmito dvěma body se nazývá astigmatický rozdíl.



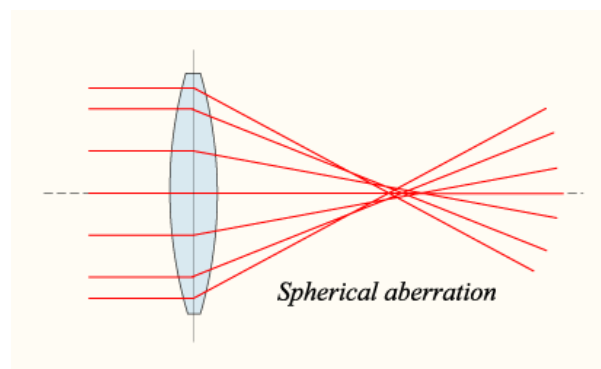
Obrázek 5.7: Schematické znázornění astigmatismu (www.starizona.com).

Vada č. 2 je typická pro mimoosové zobrazení bodu. Koma pochází z latinského slova "coma"- kometa [31], zobrazení bodu odpovídá přibližně tvaru komety. Tento efekt se neprojevuje pro osové zobrazení. Čím více se zobrazený bod vzdálí optické ose, tím více se tato vada projeví. Situace je patrná na obrázku 5.8.

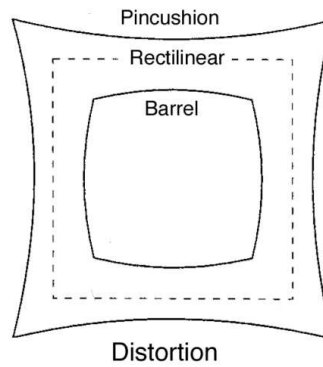
Vada č. 3 se pro čočky se sférickým povrchem projevuje tím, že paprsky blízko optické osy se nepotkají s paprsky vzdálenějšími od optické osy (viz obrázek 5.9) [32]. Obrazem bodu není bod, ale kruhová ploška.



Obrázek 5.8: Schematické znázornění komy (www.microscopy.olympus.eu).



Obrázek 5.9: Schematické znázornění sférické aberace. Paprsky se neprotínají v jednom bodě (www.microscopy.olympus.eu).



Obrázek 5.10: Distorze obrazu - poduškovité (pincushion) a soudkovité (barrel) (www.dvinfo.net).

Posledním vada č. 4 je tzv. zkreslení - distorze. Spočívá v tom, že zvětšení optické soustavy se mění se vzdáleností od optické osy [33]. Jestliže zvětšení roste mluvíme o tzv. poduškovitém zkreslení, v opačném případě se jedná o soudkovité zkreslení (viz obrázek 5.10). Pro objasnění této vady se používá zobrazení mřížky, která se charakteristicky deformuje po zobrazení optikou s touto vadou. Hodnota distorze $dist$ se většinou udává jako rozdíl skutečného zvětšení a paraxiálního zvětšení ku paraxiálnímu zvětšení:

$$dist = \frac{m - m_0}{m} = \frac{y' - y_0}{y} = \frac{\Delta y}{y_0} \cdot 100\%, \quad (5.21)$$

kde m je zvětšení, y, y_0 je velikost obrazu zkresleného, resp. obrazu v paraxiálním prostoru. Velikost distorze $dist$ se udává v procentech. Výrobci uvádí buď grafickou závislost $dist$ na vzdálenosti od osy zobrazovací soustavy, nebo hodnotu maximální $dist$. Uvádí se v procentech. Předchozí jmenované aberace nemají zásadní vliv na výpočet a analýzu obrazu pro tuto metodu. Jedná se pouze o "rozostření" obrazu bodu, popř. struktury, které se při analýze naměřených dat a výpočtu pozice neprojeví ve výsledku.

Zásadním způsobem se projeví distorze obrazu. Zaneseme se posun v obou osách obrazu (jak v horizontální, tak ve vertikální ose). Je tedy nutné při výpočtovém zpracování výsledků měření zavést kompenzaci na tuto vadu. K tomuto je nutná dobrá znalost všech parametrů zobrazovací sestavy, popř. provést měření a vypočítat korekční koeficienty.

Popis optických aberací

Budeme vycházet z obrázku 5.11. Pro výpočet posunu zobrazeného bodu v ose y platí [34]:

$$b_y = \alpha s', \quad (5.22)$$

$$da = n_2 \alpha dy, \quad (5.23)$$

$$b_y = \frac{s'}{n_2} \frac{da}{dy} = A \frac{da}{dy}. \quad (5.24)$$

Podobně pro osu x - optická osa, bude platit:

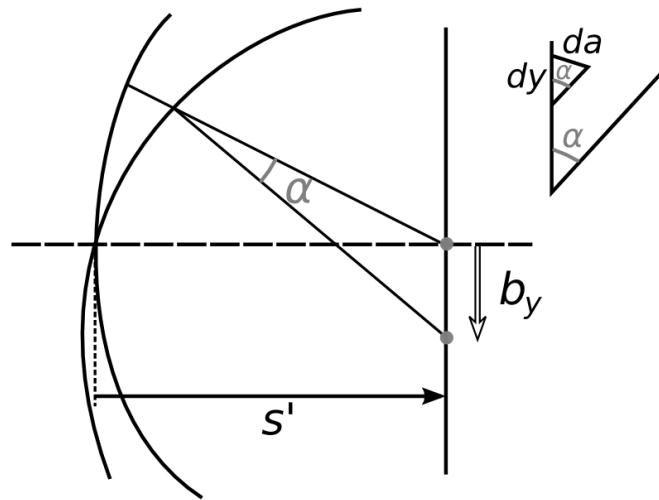
$$b_x = A \frac{da}{dx}. \quad (5.25)$$

Z obrázku 5.12 budeme počítat aberaci zobrazení bodu na optické ose. Po vyjádření optických odrazů paprsků PQP' a POP' pomocí vzdáleností a indexu lomu l, l', s, s', n_1, n_2 dostaneme pro aberaci bodu Q vztah [34]:

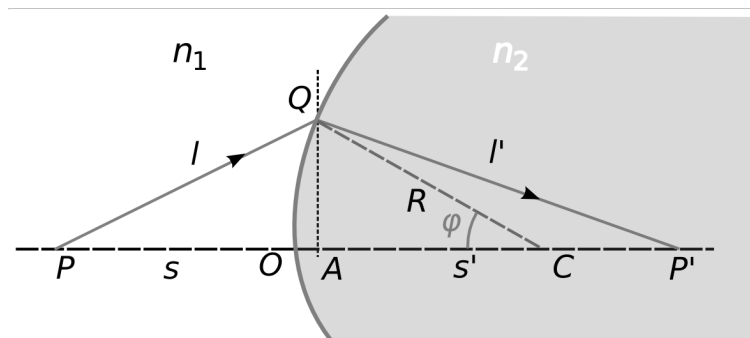
$$a(Q) = -\frac{h^4}{8} \left[\frac{n_1}{s} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{R} \right)^2 + \frac{n_2}{s'} \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{R'} \right) \right]. \quad (5.26)$$

Význam jednotlivých symbolů je patrný z obrázku 5.12. Uplatníme zde Abbeův vztah pro paraxiální zobrazení a výsledný vztah (5.26) bude mít tvar:

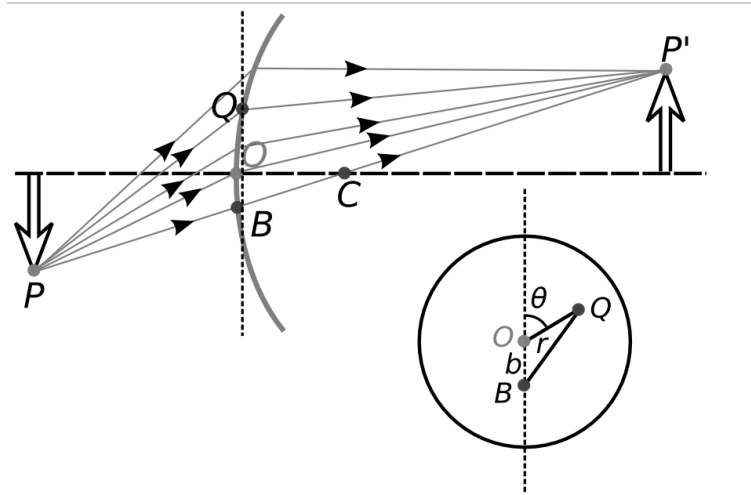
$$a = ch^4. \quad (5.27)$$



Obrázek 5.11: Deformace vlnoplochy a zobrazení jejího čela ve vzdálenosti s' [34].



Obrázek 5.12: Vliv deformace vlnoplochy na zobrazení bodu ležícího na optické ose [34].



Obrázek 5.13: Vliv deformace vlnoplochy na zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu [34].

Pro mimoosové zobrazení bodu Q budeme obdobně postupovat podle obrázku 5.13. Vypočteme opět optické dráhy a po dosazení výsledku $a'(q) = c\rho^4$ a odečtení axiální aberace $a'(0) = cb^4$, dostaneme s využitím kosinové věty pro rozvoj $\rho'^2 = r^2 + b^2 + 2rb\cos\theta$ výsledný vztah pro mimoosové aberace s použitím $b = konst h'$:

$$a(Q) = {}_0C_{04}r^4 + {}_2C_{22}h'^2r^2\cos^2\theta + {}_2C_{20}h'^2r^2 + {}_1C_{31}h'r^3\cos\theta + {}_3C_{11}h'^3r\cos\theta. \quad (5.28)$$

Koeficienty ${}_jC_{kl}$ zahrnují všechny konstantní koeficienty a vyjadřují mocniny parametrů $h', r, \cos\theta$. Jednotlivé součty vyjadřují základní aberace a nazývají se po řadě:

1. sférická (viz vztah (5.27)),
2. astigmatismus,
3. zklenutí pole,
4. koma,
5. zkreslení pole.

Pro výpočet posunu zobrazeného bodu použijeme vztah (5.24), resp. (5.25). Dostaneme pro daný posun v optické ose x a v rovině zobrazení y , resp z . Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, nejdůležitější je z hlediska optické topografie vada zkreslení. Po

uplatnění předchozích vztahů dostáváme pro výpočet posunu obrazu následující výsledky [34]:

$$b(x) = 0, b(y) = A_3 C_{11} h^3. \quad (5.29)$$

Z výsledku je patrné, že vlivem této aberace nedojde ke zkreslení ve směru optické osy. Ostrost obrazu se nezmění. Dojde však k posunu zobrazeného bodu v rovině obrazu. Tato chyba narůstá s třetí mocninou vzdálenosti obrazu od osy x . Chybu posunu zobrazeného bodu pro případ distorze lze též vyjádřit pomocí [35]:

$$b(y) = [P_1(r^2 + 2y^2 + 2P_2yz)] [1 + P_3r^3 + \dots]; \quad (5.30)$$

$$b(z) = [P_2(r^2 + 2z^2 + 2P_1zy)] [1 + P_3r^3 + \dots], \quad (5.31)$$

kde $P(r) = J_1 r^2 + J_2 r^2$, J - jsou parametry vlnoplochy, $P_1 = -J_1 \cos\theta$, $P_2 = J_1 \cos\theta$, které jsou buď uváděny výrobce, nebo mohou být změřeny a dopočítány [36].

Ze znalosti aberací použitého objektivu je možné dopočítat chyby zobrazení a korigovat výsledek ze vzorce (5.4). Tento postup je však náročný na přesnou kalibraci použité optické zobrazovací sestavy a proto je v praxi velmi zřídka používán. Hodí se například v aplikacích, kdy se měří objekty s velkým rozsahem topografické výchytky, kde není možné provést kalibraci. Například u objemných předmětů (rozměru řádově v metrech) není možné fyzicky použít kalibrační rovinu v rozměrech $n \times m$ metrů. V praxi neexistují objektivy bez distorze. Objektivy se konstruují tak, že část optické soustavy, která má poduškovité zkreslení, je vykompenzovaná částí se soudkovitým zkreslením.

5.2 Kalibrační přístup

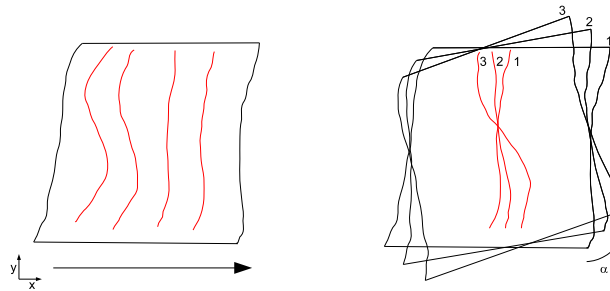
Při volbě kalibračního přístupu je nutné nakalibrovat prostor ve kterém budeme měřit a přiřadit funkční závislost prostorových souřadnic x, y, z měřeným souřadnicím. Uvažujeme situaci kartézského souřadnicového systému, kdy osa x směřuje vpravo, osa y nahoru a osa z k pozorovateli.

5.2.1 Kalibrace osy x

Osu x přiřadíme ose v 3D kartézském prostoru ve které se bude pohybovat měřený předmět. Můžeme rozlišit dva základní způsoby pohybu měřeného předmětu:

- translace,
- rotace.

Situaci ilustruje obrázek 5.14.



Obrázek 5.14: Dva způsoby pohybu měřeného předmětu. V prvním případě se s předmětem posouvá rovnoběžně s osou x vlevo. Ve druhém případě se s předmětem rotuje kolem osy z o definovaný úhel α vpravo, dostáváme tedy řezy 1, 2, 3, ... n .

Translace předmětu

V tomto případě posunujeme předmětem v ose x nejčastěji o konstantní vzdálenost a proměřujeme průnik projektované struktury s povrchem měřeného předmětu. Dostáváme tedy n řezů se souřadnicemi x_1, x_2, \dots, x_n , kde všechny body n -tého řezu mají stejnou x -ovou souřadnici. Rozlišení je dáno krokem posunu předmětu a chyba je dána chybou translačního zařízení.

Rotace předmětu

Většinou u rotačně symetrických předmětů volíme mnohdy postup postupné rotace předmětu kolem osy symetrie s krokem α . V tomto případě je nutné přepočítat souřadnice x a y měřených bodů. Převádíme ze sférických souřadnic na kartézské v rovině x, y . V tomto

případě je úhel $\varphi = \alpha$ a souřadnici x počítáme z pozice bodu vůči středu r , kde $r = n \cdot l_{pixel}$. Parametr l_{pixel} označuje velikost pixelu v ose y daného kalibrací. Potom souřadnice v obou osách vypočítáme pomocí vztahů: $x = r \cos \alpha$ a $y = r \sin \alpha$.

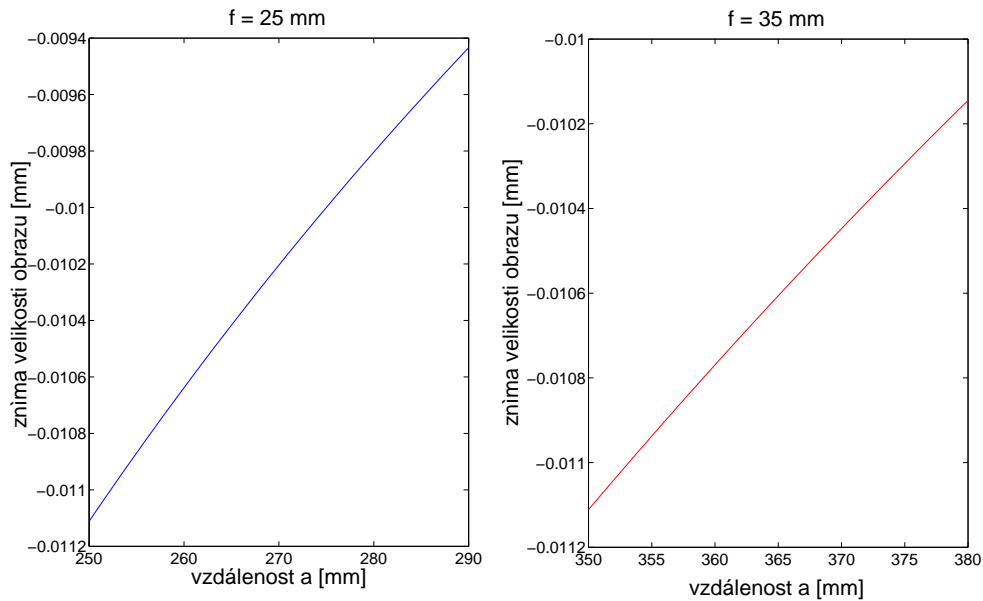
5.2.2 Kalibrace osy y

V této ose je rozlišení dáno vzdáleností jednotlivých pixelů od sebe, respektive vzdáleností jednotlivých řádků. Chyba je dána chybou zpracování matice fotocitlivých pixelů daného snímacího zařízení. Kalibrace se provádí pomocí referenčního měřítka. Nasnímá se referenční měřítka a přepočítá se velikost jednoho pixelu l_{pixel} ze znalosti velikosti měřítka. Potom souřadnice bodu v této ose bude $y = n \cdot l_{pixel}$. Vzhledem k volbě objektivu je nutné počítat změnu velikosti obrazu se změnou vzdálenosti zkoumaného předmětu od objektivu záznamového zařízení. Pokud se povrch předmětu v ose z nemění (řádově v mm), není nutné zavádět kompenzace v ose y . Pokud však nastane situace, kdy vlivem zvětšení objektivu nebude konstantní velikost jednoho pixelu, musíme provést kompenzace na toto zkreslení. Jestliže bude vzdálenost pozorovaného předmětu dostatečně velká oproti ohniskové vzdálenosti objektivu ($a \gg f$), pak je možné na objektiv pohlížet jako na tenkou čočku (není nutné znát hlavní roviny objektivu pro měření vzdáleností a a f). Můžeme v tomto případě použít vztah pro příčné zvětšení m : $m = -f/a - f$, kde f je ohnisková vzdálenost objektivu a a je vzdálenost předmětu od čočky. Pro experiment s použitými objektivy $f = 25mm$ a $f = 35mm$ a vzdáleností předmětu $250 \div 290mm$, resp. $350 \div 380mm$ a rozlišení kamery $1200 pixel$ vertikálně vychází toto zkreslení dle obrázku 5.15.

Z obrázku je patrné že se velikost pixelu mění v rádu tisícín mm . Pro měření metodou s rozlišením v setinách mm je proto tato chyba zanedbatelná. Horší situace nastane v případě objektivu s krátkým ohniskem f a malou vzdáleností a . V tomto případě se dostáváme na chybu v řádech setin mm . Navíc se tato chyba kombinuje se zkreslením objektivu, popsaném v kapitole 5.1.4, a roste směrem od osy objektivu.

5.2.3 Kalibrace osy z

Při použití kalibračního přístupu je nutné vytvořit referenční - kalibrační roviny, k nimž se bude topografie měřeného povrchu vztahovat. Zmapují se průměty roviny projektované

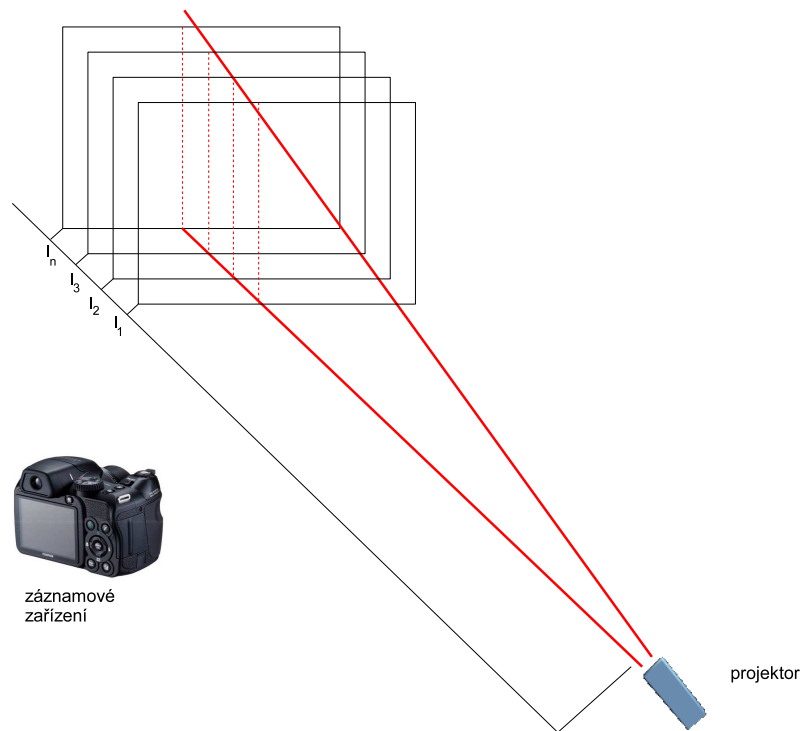


Obrázek 5.15: Změna kalibrační konstanty v ose y v závislosti na volbě objektivu a vzdálenosti měřeného předmětu od objektivu.

stopy (kolmé na osu z) a n referenčních rovin (opět kolmých na rovinu projektované stopy) vzdálených od projektoru l_1, l_2, \dots, l_n (viz obrázek 5.16), kde se nejčastěji krok k volí ekvidistantní $k = ABS[l_{n-1} - l_n] = konst.$

Při reálném měření se v daném řádku snímku vypočítá střed projektované struktury. Mějme měřený bod v obrázku se souřadnicemi x_{pixel}, y_{line} , kde x_{pixel} je střed projektované struktury v y_{line} řádku snímku, ve kterém počítáme topografickou výchylku v ose z . Poté se hledá nejbližší referenční rovina kolem x_{pixel} v témž řádku y_{line} . Topografická výchylka tohoto bodu na povrchu zkoumaného předmětu může tedy odpovídat nejbližší možné kalibrační rovině. V tomto případě by bylo rozlišení v ose z dáno velikostí ekvidistantního kroku kalibrace k a chyba výpočtu souřadnice z bude $\pm 1/2k$. Pro zvýšení citlivosti je nutné znát funkční předpis závislosti vzdáleností jednotlivých kalibračních rovin a jejich pozice na záznamovém zařízení při kalibraci: $z = f(l_1, \dots, l_n)$. Je nutné provést analýzu této funkční závislosti přes celé zorné pole. Pro objektivy s malým zkreslením je tato závislost lineární. V okrajích zorného pole se může projevit sklenutí pole, popř. zkreslení. V tomto případě je nutné provádět kompenzace na tyto vady zavedením nelineární převodní charakteristiky.

Z obrázku 5.17 je vidět vyhodnocení kalibrace experimentální sestavy. Byla fitována



Obrázek 5.16: Kalibrace osy z pomocí referenčních rovin z pohledu záznamového zařízení.

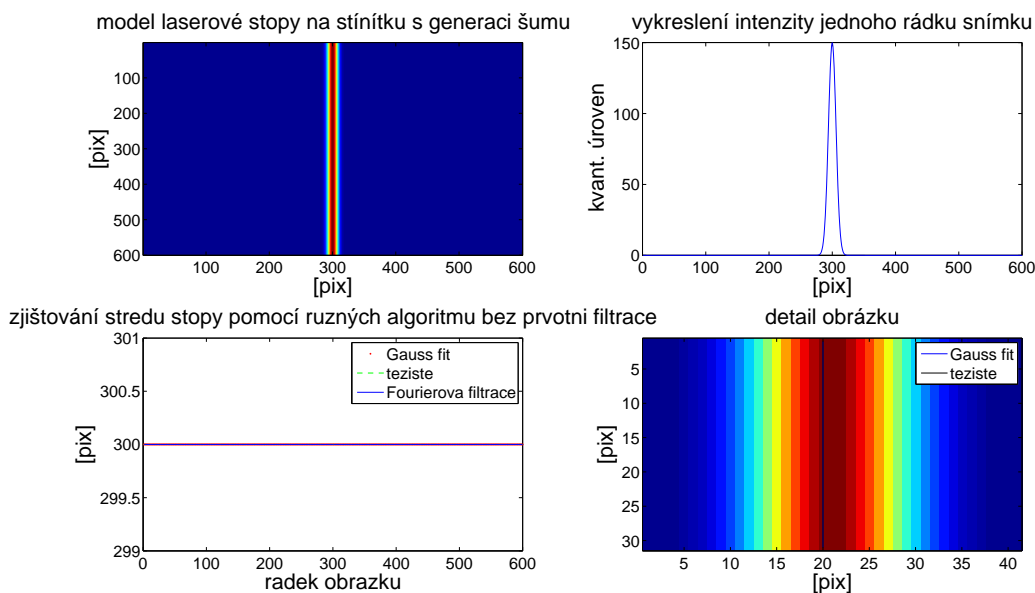
data z jednotlivých řádků obrazu nasnímaných pro dané kalibrační roviny. Pro fitování byl použit polynom prvního řádu $y = kx_i + q$, kde x jsou pozice stop v jednotlivých kalibračních rovinách i . Je patrné že směrnice k a úsek q se mění velice málo. Je možné pro celé zorné pole zvolit jediný polynom pro všechny analyzované řádky. Tím se situace velice zjednoduší.



Obrázek 5.17: Průběh směrnic k a úseku q při fitování kalibračních dat polynomem prvního řádu pro vybrané řádky snímaného profilu.

5.3 Analýza laserové stopy

Následující text popisuje postup lokalizace a analýzy laserové stopy vzniklé projekcí pomocí laserového projektoru na zkoumaný povrch předmětu nebo na kalibrační rovinu. Cílem tohoto kroku je lokalizace obrazu světelné stopy na snímku získaného pomocí digitální kamery. V ideálním případě dostaneme jako výstup obrázek, kde binární hodnota jednotlivých pixelů snímku odpovídá intenzitě světla bodu povrchu zobrazeného na kameře, na kterém budou mít body mimo obraz stopy nulovou (resp. šumovou) hodnotu intenzity a světelná stopa bude reprezentována body s kvantizační hodnotou odpovídající její intenzitě. V reálném případě bude celý snímek zatížen jednak kvantizačním šumem a šumem fotocitlivého prvku. Ideální případ popisuje obrázek 5.18.

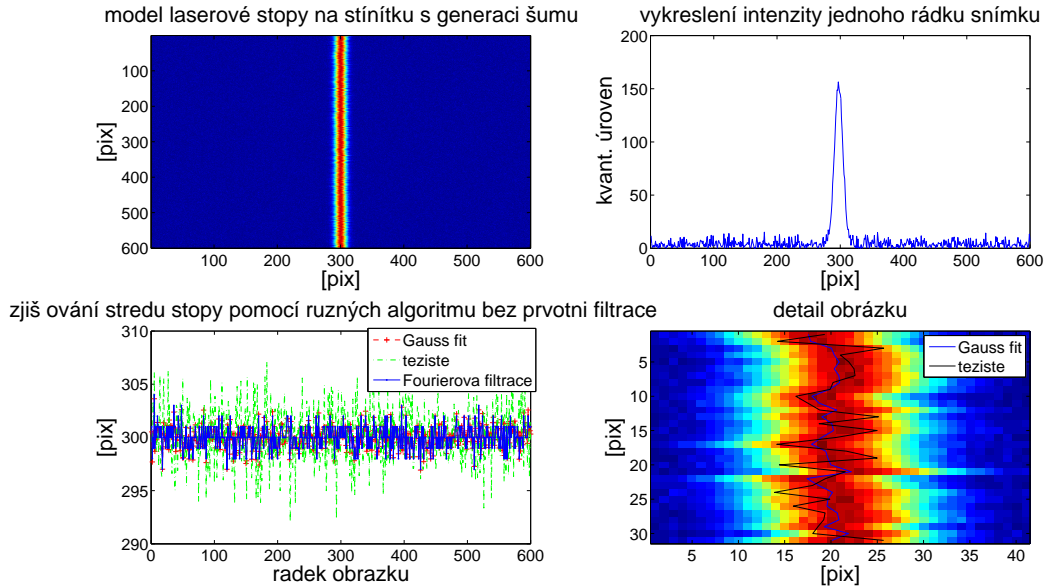


Obrázek 5.18: Idealizovaný snímek laserové stopy bez šumu.

Na obrázku 5.18 je situace, kdy průběh intenzity laserové stopy má Gaussovský charakter. Snímek není zatížen žádným šumem, takže pixely mimo obraz laserové stopy mají nulovou hodnotu odpovídající nulové intenzitě světla. Snímek je analyzován třemi metodami. Střed každého řádku je vypočítán pomocí fitování Gaussovou funkcí, pomocí výpočtu těžiště v daném řádku a nakonec pomocí Fourierovy transformace, filtrace ve frekvenční oblasti a zpětné Fourierovy transformace. Všechny tyto metody a algoritmy výpočtu budou popsány v následujících kapitolách. Je patrné že pro tento případ dosáhneme stejných

výsledků u všech třech metod. Obrázek ukazuje průběh intenzity ve vybraném řádku a výsledek výpočtu středu stopy pomocí zmíněných metod. Je patrná shoda výsledku těchto výpočtů.

Situace se změní v případě reálných měření. Tento případ je přiblížen na následujícím obrázku. Obrázek 5.19 vykazuje zkresení pomocí šumu. Průběh intenzity světla v řezu



Obrázek 5.19: Analýza laserové stopy modelového případu s integrací náhodného šumu.

laserové stopy má gaussovský charakter platí:

$$I = I_0 e^{-\frac{(pix-b)^2}{2c^2}}. \quad (5.32)$$

V jednotlivých řádcích je přičten k tomuto průběhu náhodný posun střední hodnoty $b = b + randn$ a stejně je manipulováno s rozptylem $c = c + randn$ tak, aby se situace přiblížila reálnému měření. Proměnná pix je pozice v obrázku v pixelech. Snímek byl poté ještě zatížen náhodným šumem pozadí. Výsledek je patrný z obrázku 5.19. Vlevo nahoře je celý snímek. Vpravo nahoře je vykreslen průběh intenzity ve vybraném řádku. Opět lze vidět jemné zkresení pomocí náhodného šumu. Na obrázku vlevo dole jsou pak vypočteny středy laserové stopy v jednotlivých řádcích obrázku. Je patrné, že nejvíce se od skutečné hodnoty liší výpočet pomocí těžiště intenzit v řádku (zelená křivka). Je to dáno tím, že nedošlo k prvotní úpravě snímku pomocí filtrace. Další dva průběhy (modrý a červený) reprezentují

výpočet pomocí Gaussovského proložení a Fourierovy filtrace. Lze sledovat lepší shodu výsledků než v případě porovnání s metodou využívající výpočtu těžiště. Poslední část obrázku vpravo dole ukazuje srovnání výpočtu pomocí Gausse a těžiště na výřezu snímku. Je patrné že výpočet pomocí Gausse je přesnější.

Při porovnání rychlosti výpočtu středu laserové stopy přes celý obrázek lze konstatovat tento závěr. V případě metody těžiště a Fourierovy filtrace jsou časy na získání potřebného výsledku v řádu desítek milisekund (metoda těžiště), desetin sekundy (Fourierova filtrace), resp desítek sekund pro výpočet pomocí Gaussovy funkce.

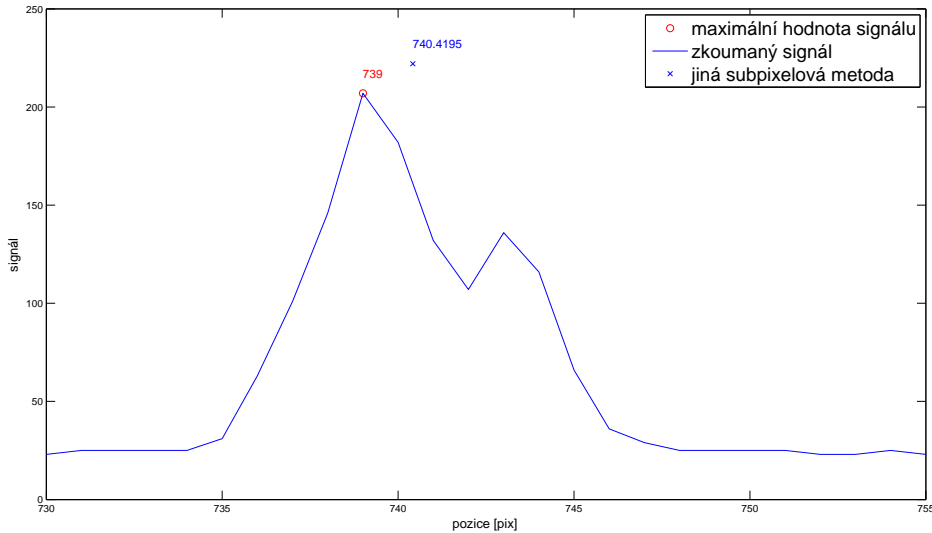
5.4 Metody výpočtu středu laserové stopy

Tato podkapitola popisuje výpočet středu laserové stopy pomocí několika metod. Tyto metody lze dělit buď podle rychlosti výpočtu, nebo podle citlivosti. První dvě metody (metoda maxima a metoda těžiště) jsou časově méně náročné. Jejich citlivost je však v porovnání s ostatními nižší. Časově nejnáročnější je metoda využívající fitování pomocí Gaussovy funkce. Poslední metoda využívající Fourierovy filtrace je rychlejší než Gaussova, je však méně přesná. Oproti metodě maxima a metodě těžiště již při výpočtu dochází k filtraci signálu a tím ke zpřesnění výsledku. Při volbě metody je nutné brát ohled na dobu potřebnou pro zpracování výsledku v rámci měření jako celku a také citlivost s jakou potřebujeme měřit.

5.4.1 Metoda maxima

Nejrychlejší metodou výpočtu středu stopy je metoda hledání maximální hodnoty signálu v jednotlivých řádcích. Středu v daném řádku je přidělen pixel s maximální hodnotou signálu. Rozlišení této metody je tedy $\pm pixel$. Jedna se o nejméně přesný výpočet. Pro některé typy měření je to však dostačující rozlišení, které přináší právě výhodu v rychlosti výpočtu. Jistou nevýhodou tohoto typu výpočtu je velká závislost výsledku na tvaru, vlastnostech povrchu a nastavení detekčního systému. Tuto metodu lze použít pro homogenní povrchy nevykazující lokální změny reflektivity (resp. drsnosti). Nesmí docházet ke změně intenzity odraženého světla od povrchu uvnitř osvětlované oblasti. Odražené

světlo by mělo mít stejný intenzitní průběh jako světlo dopadající. Další problém může nastat v případě saturace snímacího prvku. V tomto případě při vyhodnocení dosáhne maximální hodnoty několik pixelů v jednom řádku a je nutné zavádět další výpočty do vyhodnocení. Na obrázku 5.20 je ukázán výpočet středu průběhu signálu pomocí této metody a srovnání s jiným způsobem popsaným v dalším textu.



Obrázek 5.20: Výpočet středu světelné stopy pomocí hledání maxima signálu.

5.4.2 Metoda těžiště

Při výpočtu středu stopy n -tého řádku pomocí této metody ve snímku o m sloupcích je využitý následující vztah:

$$x_{center_n} = \frac{\sum(H_{nm} \cdot x_m)}{\sum(H_{nm})}, \quad (5.33)$$

kde x_{center_n} je střed stopy v n -tém řádku snímku, H_{nm} je binární hodnota pixelu v n -tém řádku a m -tém sloupci snímku a x_m je m -tý sloupec řádku n . Nutností tohoto zpracování je předchozí úprava obrázku. Je nutné odstranit šum a vadné pixely ve snímku. Tyto parazitní signály by vnašely do výsledku nejistotu. Celková nejistota této metody vyhodnocení je dána jednak nejistotou ΔH_{nm} a pak nejistotou Δx_m .

První typ nejistoty je dán hlavně kvantizační chybou digitálního obrazového snímače.

Tuto chybu je možné vypočítat pomocí výrazu:

$$\epsilon_{nbit} \leq \frac{X_{max} - X_{min}}{2^{n+1}}, \quad (5.34)$$

kde $X_{max,min}$ jsou maximální a minimální hodnoty nabývané parametrem X a n je počet bitů, které kvantujeme. V našem případě se jedná o osmi bitový převodník s 256 kvantovacími úrovněmi. Potom maximální chyba při kvantování je rovna: $\epsilon_{nbit} = 0,5$. Dalším zdrojem nejistoty výpočtu je tepelný šum snímacího prvku. Budeme jeho hodnotu pro laboratorní podmínky a velice krátké expozice zanedbávat. Podstatnější vliv na výslednou kvantizační hodnotu bude mít saturace a tzv. blooming efekt. Je proto nutné při měření nastavovat takové parametry expozice a zisku snímacího prvku, aby nedošlo k tomuto ovlivnění výsledku.

Druhý typ nejistoty výpočtu je dán samotnou konstrukcí snímače. Jedná se o velikost jednotlivých fotocitlivých buněk. Při měření předpokládáme, že jejich rozměr je konstantní v rámci celého snímače. Kvalita snímače by se projevila při výsledcích měření. Jelikož se výsledný snímek ukládá do matice m, n , v reálu mohou mít buňky jednotlivých sloupců dvou sousedních řádků různou pozici na snímači. Při výpočtu však s touto chybou nepočítáme. Jistým řešením by byla kalibrace snímače pomocí čárového testu. Jelikož je však struktura moderních snímačů dostatečně jemná (řádově mají buňky rozměr jednotek μm , lze tuto chybu zanedbat pro většinu klasických topografických měření.

Výsledná nejistota výpočtu daná zákonem šíření nejistoty tedy bude dána vztahem:

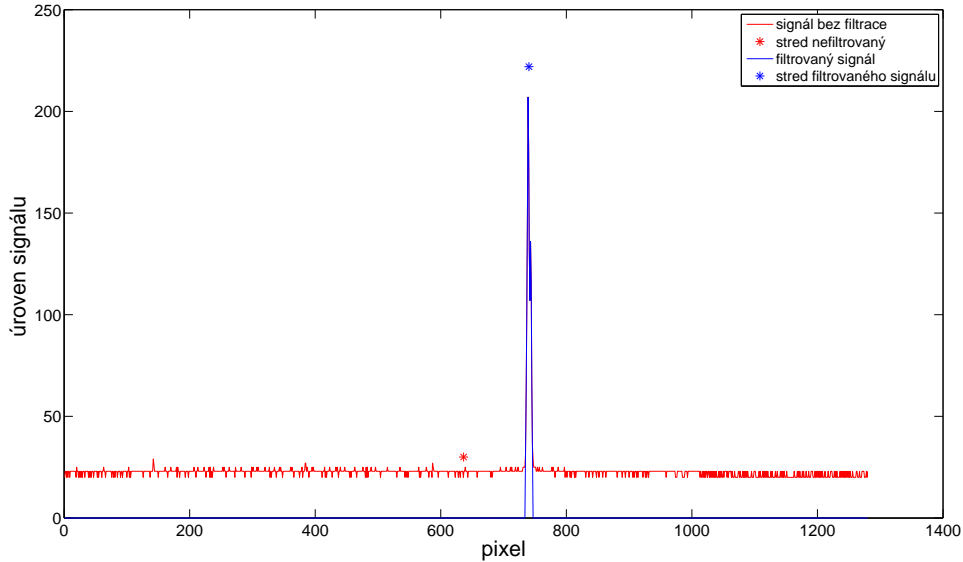
$$\frac{\delta x_{center_n}}{\delta h} = \frac{P \cdot \sum_1^m x_i - n \cdot \sum_1^m x_i \cdot H_{n_i}}{P^2} = \frac{\sum_1^m x_i}{P} - \frac{m \cdot x_{center_n}}{P} = \frac{1}{P} \sum_1^m x_i - x_{center_n}, \quad (5.35)$$

kde $P = \sum_1^m x_i \cdot H_{n_i}$. Chyba výpočtu pak bude rovna:

$$\delta x_{center_n} = \sqrt{\left(\frac{1}{P} \sum_1^m x_i - x_{center_n}\right)^2 \delta h^2}. \quad (5.36)$$

Zápis δh je chyba kvantizace. Při zpracování snímků touto metodou je nutné přistoupit k úpravě snímku před samotným výpočtem. Je nutné omezit šum a vadné pixely v obraze tak, aby neovlivnili výsledek. Provedeme jednoduchou operaci prahování. Nastaví se určitá

úroveň H_{n_m} , pro kterou budou ostatní pixely s nižší úrovní ignorovány ve výpočtu. Pro ilustraci je na obrázku 5.21 uveden výsledek výpočtu středu stopy bez a s použitím filtrace.



Obrázek 5.21: Výpočet středu filtrovaného a nefiltrovaného signálu, je patrný rozdíl pozice středu při výpočtu obou signálů. V tomto případě jde o záznam s dlouhým expozičním časem, který zanesl do snímku velké množství šumu.

Na grafu 5.21 lze ilustrovat, jak je v některých případech nutné upravit zkoumaný snímek před samotným zpracováním. Tento snímek však byl ovlivněn tepelným šumem a dlouhou expoziční dobou. Před zpracováním naměřených dat je nutné kontrolovat kvalitu snímků, nebo zavést automatické výpočetní algoritmy pro analýzu úrovně šumu a zkreslení signálu ve snímku.

5.4.3 Proložení Gaussovskou funkcí

Při použití této metody výpočtu je průběh jednotlivých řádků proložen Gaussovou funkcí pomocí nelineární metody nejmenších čtverců. Platí vztah:

$$H_n = H_0 e^{-\frac{(x_{m_n} - x_{center_n})^2}{2\sigma_{x_n}^2}}, \quad (5.37)$$

kde H_0 je amplituda funkce, σ_{x_n} je směrodatná odchylka pro daný řádek.

Metoda je založená na nelineární regresní analýze. Naměřenými hodnotami $H_{n_1} \div H_{n_m}$ chceme proložit funkci (5.37). Hledáme tedy parametry této funkce, které označíme jako vektor $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3,)(H_0, x_{center_n}, \sigma_{x_n})$. To znamená, že hledáme takový vektor, pro jehož součet čtverců $S(\vec{a}) = \sum_1^m (f(\vec{a}, x_i) - H_{n_i})^2$ je jeho hodnota nejmenší. Derivujeme poté veličinu S podle všech neznámých parametrů a dostaneme tak soustavu tří nelineárních rovnic. Pro jednotlivé derivace využijeme vztahů:

$$\frac{\delta H_n}{\delta H_0} = e^{-\frac{(x_{m_n} - x_{center_n})^2}{2\sigma_{x_n}^2}} \quad (5.38)$$

$$\frac{\delta H_n}{\delta x_{center_n}} = \frac{H_0(x_{m_n} - x_{center_n})}{\sigma_{x_n}^2} e^{-\frac{(x_{m_n} - x_{center_n})^2}{2\sigma_{x_n}^2}} \quad (5.39)$$

$$\frac{\delta H_n}{\delta \sigma_{x_n}} = \frac{H_0(x_{m_n} - x_{center_n})^2}{\sigma_{x_n}^3} e^{-\frac{(x_{m_n} - x_{center_n})^2}{2\sigma_{x_n}^2}} \quad (5.40)$$

Pro řešení této soustavy nelineárních rovnic použijeme Newtonovu metodu. Pro vektorovou funkci $\vec{f} = (f_1, f_2, f_3)$ tvořenou parciálními derivacemi původní funkce a vektor \vec{a} vytvoříme matici parciálních derivací.

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta H_0} & \frac{\delta f_1}{\delta x_{center_n}} & \frac{\delta f_1}{\delta \sigma_{x_n}} \\ \frac{\delta f_2}{\delta H_0} & \frac{\delta f_2}{\delta x_{center_n}} & \frac{\delta f_2}{\delta \sigma_{x_n}} \\ \frac{\delta f_3}{\delta H_0} & \frac{\delta f_3}{\delta x_{center_n}} & \frac{\delta f_3}{\delta \sigma_{x_n}} \end{pmatrix}$$

Pro výpočet $(k + 1)$ -té iterace použijeme vztah:

$$\vec{a}^{k+1} = \vec{a}^k - M(\vec{a}^k) \cdot f(\vec{a}^{k+1}) \quad (5.41)$$

Postupujeme tak, aby rozdíl $S(\vec{a}) = \sum_1^m (f(\vec{a}, x_i) - H_{n_i})^2$ byl co nejmenší. Výsledkem jsou parametry z nichž je nejdůležitější hodnota x_{center_n} . Nejistota výpočtu je daná metodou samotnou a je závislá na množství iterací při výpočtu.

Pro výpočet chyby měření je nutné vypočítat derivace funkce podle x_n, H_0 a σ_{x_n} (viz (5.38), (5.39), (5.40)) a dosadit do upraveného vztahu pro výpočet středu x_{center_n} z funkce (5.37).

5.4.4 Fourierova filtrace

Tato metoda využívá výpočtu pomocí diskrétní Fourierovy transformace. Princip výpočtu středu stopy z obrázku v jednotlivých řádcích spočívá ve využití rychlé Fourierově transformaci (FFT), následné filtraci signálu a poté ve zpětné Fourierově transformaci (IFFT)

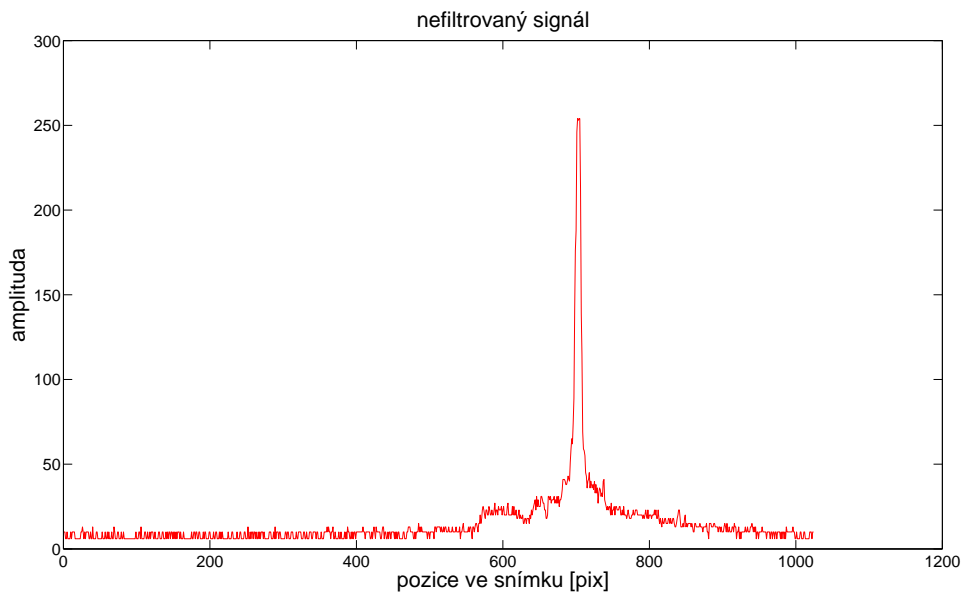
a výpočtu středu. Metoda využívá rychlého výpočtového algoritmu FFT a IFFT v počítači. Další předností je jednoduchá filtrace signálu od šumu a vadných dat. V následujících obrázcích 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 je popsán princip filtrace a zpětné rekonstrukce průběhu intenzity v jednom řádku reálného snímku. Původní snímek je zašuměný a saturovaný v místě obrazu světelné stopy na hodnotě 255. Na obrázku 5.23 jsou některé prostorové frekvence obsažené v původním signálu. Červeně je základní frekvence ostatní jsou barevně odlišeny. Na dalších obrázcích 5.24 a 5.25 je ukázána rekonstrukce původního signálu sumací jednotlivých prostorových frekvencí. Pro analýzu signálu využijeme vztahů pro diskrétní Fourierovu transformaci mezi posloupnostmi diskrétních hodnot $d(k)_{k=0}^{N-1}$ a $D(n)_{n=0}^{N-1}$:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k)e^{-nki2\pi/N}, n = 0, \dots, N - 1, \quad (5.42)$$

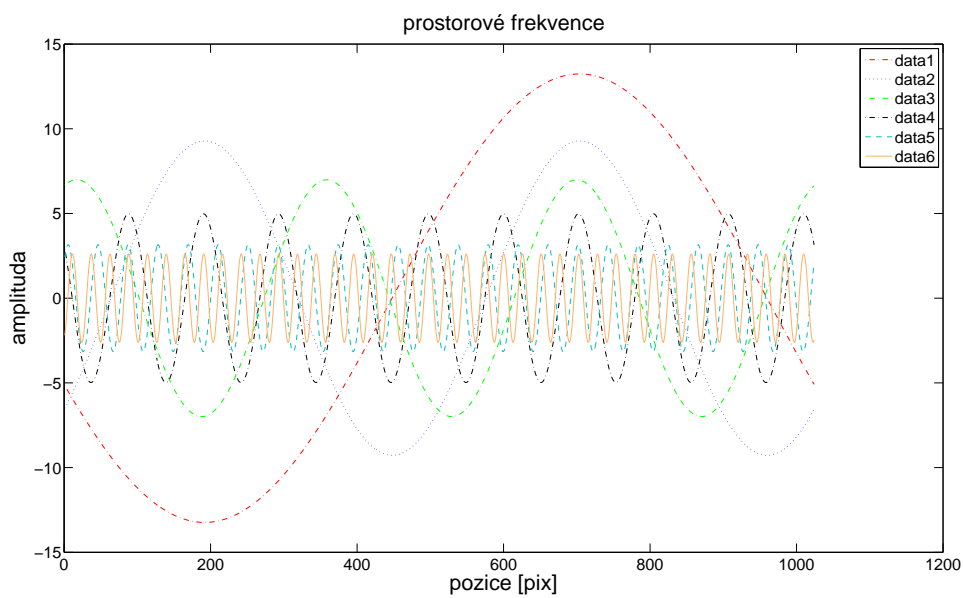
$$d(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D(n)e^{nki2\pi/N}, k = 0, \dots, N - 1. \quad (5.43)$$

Signál po transformaci vyfiltruje, zachovají se nejnižší prostorové frekvence, které nesou informaci o pozici maxima projektované stopy (jelikož se nachází pouze jedenkrát v signálu má nejnižší prostorovou frekvenci), provede se zpětná Fourierova transformace. Z maxima se vypočítá pozice středu stopy. Na obrázku 5.22 je srovnání signálu po filtraci a vypočítaný střed stopy pomocí fitování Gaussovou funkcí. Je patrná shoda obou postupů. Výhodou výpočtu pomocí Fourierovy filtrace je vysoká rychlost zpracování díky optimalizaci výpočtu této transformace v počítači.

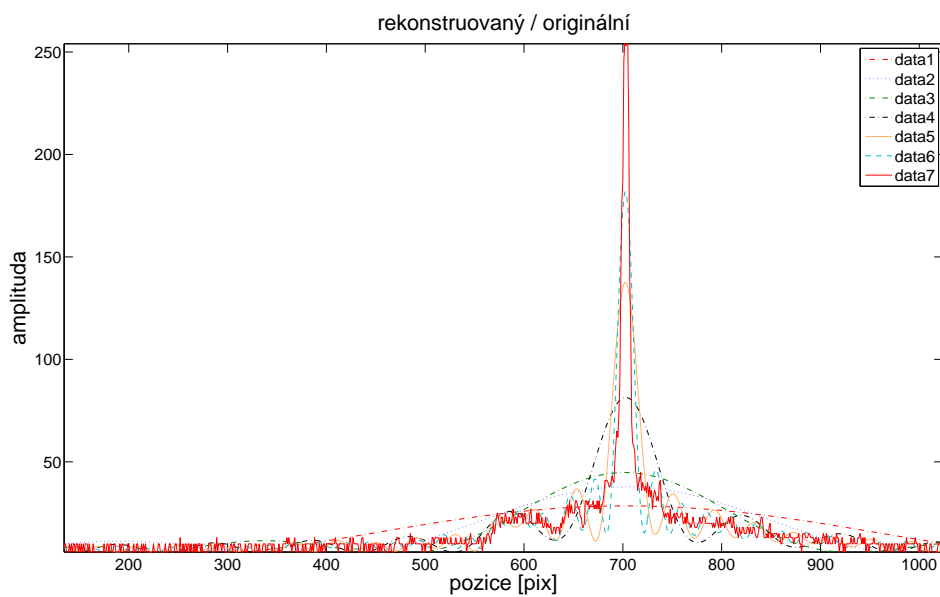
Skripty v programovém prostředí Matlab jsou uvedeny v Příloze A.1.



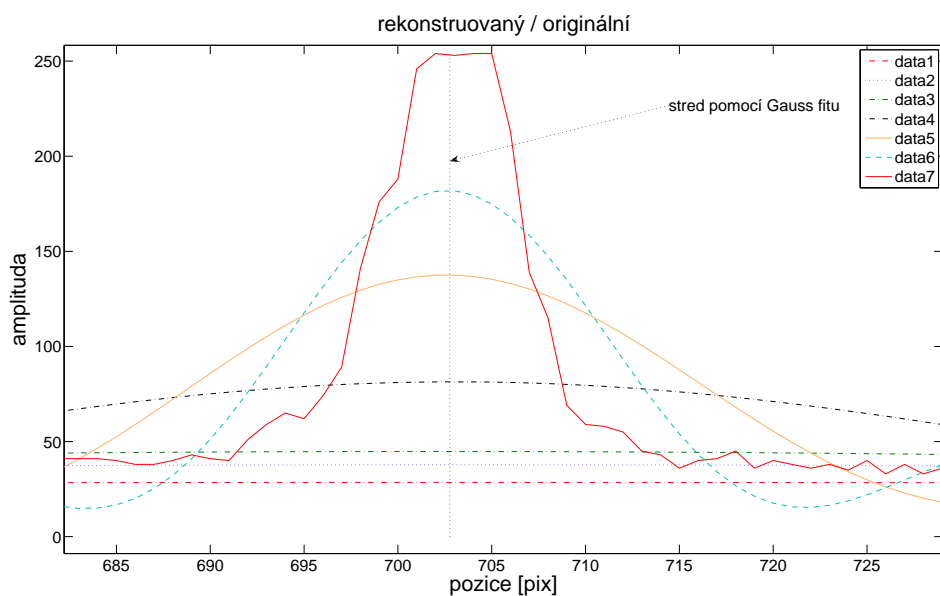
Obrázek 5.22: Průběh odpovídající intenzitě světla jednoho řádku testovaného snímku.



Obrázek 5.23: Prostorové frekvence v jednoho řádku zkoumaného obrázku.



Obrázek 5.24: Rekonstruovaný povrch pomocí prostorových frekvencí vypočítaných pomocí diskretní Fourierovy transformace.



Obrázek 5.25: Rekonstruovaný povrch pomocí prostorových frekvencí vypočítaných pomocí diskretní Fourierovy transformace. Srovnání průběhu rekonstrukce a výpočtu středu průběhu pomocí fitování Gaussovou funkcí. Z obrázku je patrná shoda středu s maximum rekonstruovaného průběhu.

5.5 Vliv justáže měřicí sestavy na chyby měření

Nastavení experimentální sestavy má velký vliv na výsledek měření objemu zkoumané předmětu. Největší chybou nastavení sestavy je špatně zorientovaný projektor světelné struktury. Tento problém můžeme rozdělit na dva samostatné problémy. Budeme uvažovat měření tvaru kloubní jamky kyčelní endoprotézy. Vzhledem k jejímu tvaru ji lze zjednodušeně rozdělit na dva jednoduché objekty - polokouli a válec, osou symetrie jamky (osou jamky) budeme uvažovat osu válce. V prvním jednodušším případě se můžeme dopustit chyby měření posunem roviny osvitu vůči ose měřené jamky (posun od mediální roviny). V druhém případě dojde k natočení roviny osvitu vůči sagitální rovině jamky.

5.5.1 Chyby způsobené posunem roviny procesu

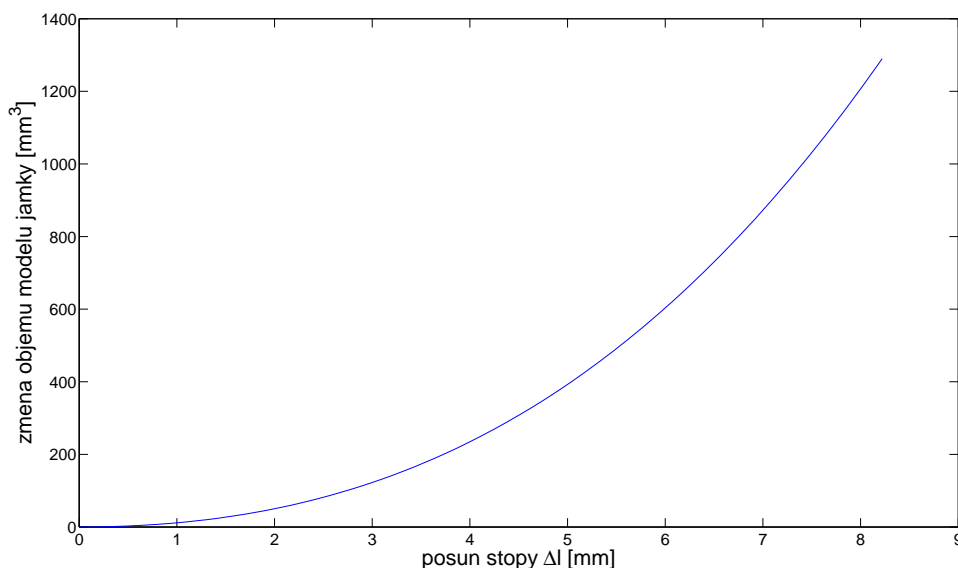
V tomto případě není rovina projektované stopy totožná s mediální rovinou jamky (osa projektoru a osa jamky nejsou totožné, jsou však rovnoběžné). Dojde tedy ke zmenšení obrazu projektované stopy na předmětu. Lze si to představit takto: mějme kouli, veďme jeden řez koulí jejím středem. Další řez povedeme v rovině rovnoběžné s rovinou původního řezu, avšak posunutou o délku Δl od původní roviny. Průnik těchto rovin a koule jsou vždy dvě kružnice. V našem případě zjednodušíme tvar jamky na polokouli a část válce přidruženého k této polokouli (což je náš model). Při reálném měření se s jamkou rotuje o definovaný úhel $n/180^\circ$ okolo osy jamky, kde n je počet kroků rotace. V modelu tedy budeme počítat rozdíl objemů dvou objektů: polokoule + válec (původní a posunutá stopy). První je polokoule s poloměrem $r = 14mm$ a průměrem válce $d = 28mm$, výškou válce $v = 5mm$. Druhým objektem je polokoule a válec jejich průměr je zmenšen úměrně o Δl , což odpovídá při reálném měření posunu projektované struktury vůči ose jamky. Výsledný rozdíl objemu je dán vztahem:

$$\Delta V = \frac{1}{6}\pi(d_1 - d_2)^3 + \frac{\pi v}{4}(d_1 - d_2)^2, \quad (5.44)$$

kde d_1 je průměr původní koule a válce a d_2 je průměr koule a válce vzniklé řezem původních druhou rovinou. Průměr se změní na hodnotu danou vztavem:

$$d_2 = 2\sqrt{\frac{d_1^2}{4} - \Delta l^2}. \quad (5.45)$$

Chyby měření jsou zobrazeny na obrázcích 5.26 a 5.27.



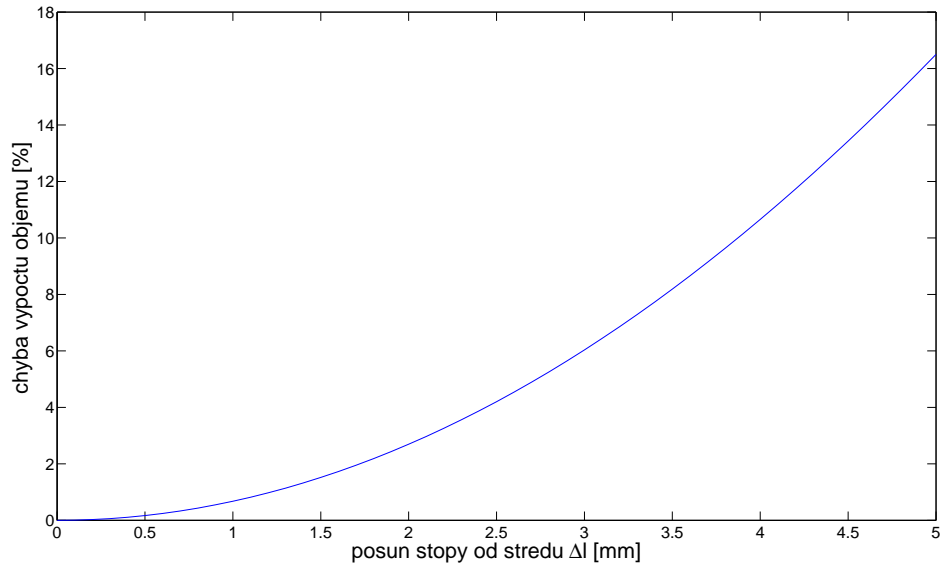
Obrázek 5.26: Rozdíl objemu objektu při různých posunech projektované stopy.

Z uvedených obrázků je patrné, že chyba do 10% nastává při posunu projektované struktury v řádu mm. Při justování je tedy potřeba nastavit její polohu co nejpřesněji. Princip justáže je popsán v následujícím textu.

5.5.2 Chyby způsobené natočením zdroje osvitů

Tento případ nastane v situaci, kdy rovina osvitů není rovnoběžná s mediální rovinou měřené jamky. Nejprve rozebereme případ, kdy dojde k pouhému otočení kolem osy rotace modelu. Průnikem jamky a roviny osvitů je opět kružnice. Jelikož ale pozorujeme měřenou jamku pod úhlem β (viz kapitola 5), nezobrazí se řez jako kružnice, ale dojde k její deformaci. Výsledný tvar projektované struktury bude vlastně dán průmětem do mediální roviny jamky. Tvar stopy se přetransformuje na elipsu, kde osy elipsy budou dány úhlem natočení projektované stopy vůči ose jamky. Výsledný objem je tedy objem elipsoidu který má jednu poloosu a rovnou poloměru původní jamky (nedojde k deformaci ve směru promítání) a dvě zbylé poloosy b, c kolmé na tuto budou dány vztahem: (5.45). Potom pro výpočet objemu celého elipsoidu platí vztah:

$$V = \frac{4}{3}\pi abc = \frac{4}{3}\pi ab^2. \quad (5.46)$$



Obrázek 5.27: Procentuální chyba výpočtu objemu tělesa při daném posunu projektované struktury (horizontální osa).

Změna objemu je tedy dána rozdílem objemu koule a elipsoidu v závislosti na úhlu natočení projektované stopy. Objem válce se zmenší úměrně změně b nebo c .

Závislost změny poloosy na úhlu natočení α je dán vztahem:

$$b = a \cos \alpha. \quad (5.47)$$

Dosazením vztahu (5.47) do rovnice pro výpočet objemu dostáváme vztah:

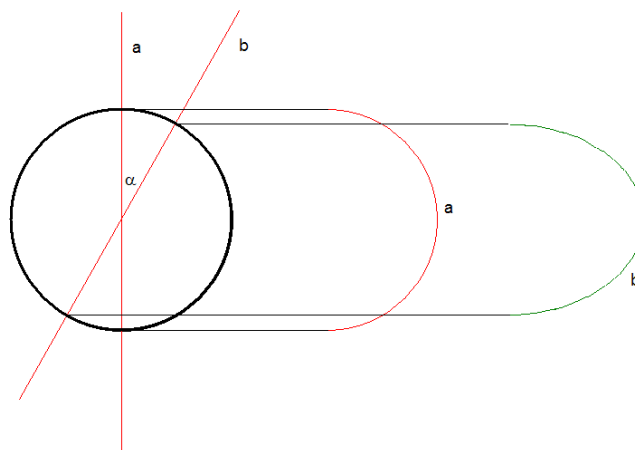
$$V = \frac{4}{6} \pi a^3 (\cos \alpha)^2 \quad (5.48)$$

a pro změnu objemu platí:

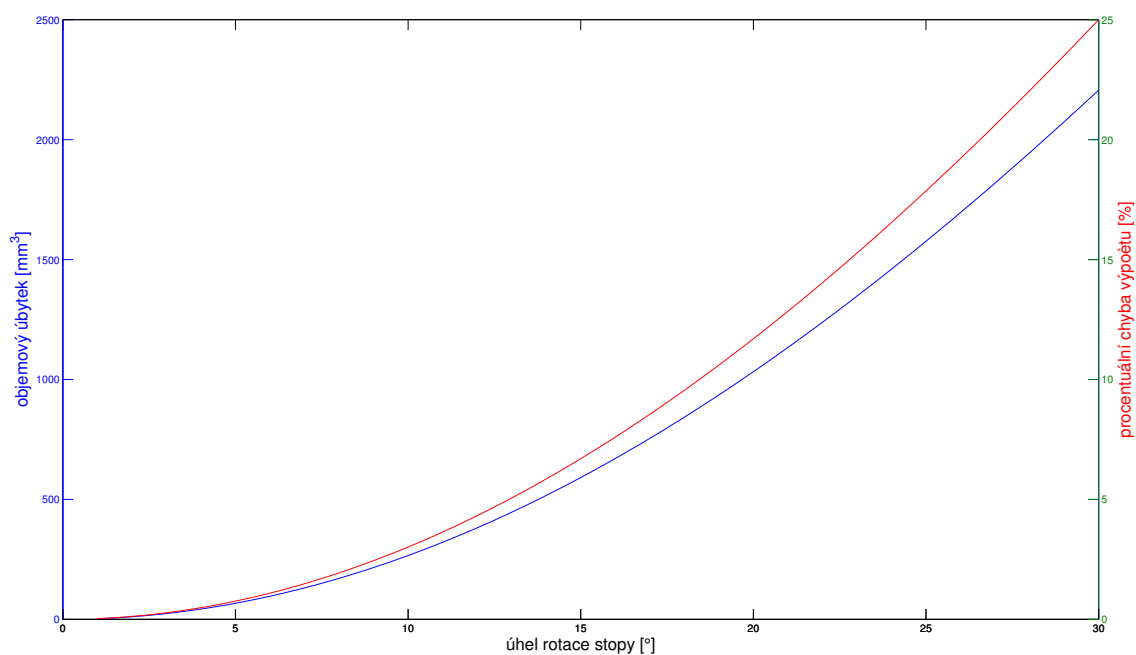
$$\Delta V = \frac{4}{6} \pi a^3 (1 - \cos^2 \alpha) + \pi v a^2 (1 - \cos^2 \alpha). \quad (5.49)$$

Na obrázku 5.29 je graficky znázorněna chyba určení objemu při rotaci projektované struktury o úhel α v intervalu $0 \div 30^\circ$ (levá vertikální osa). Dále je zde uvedena procentuální chyba objemu v závislosti na tomto úhlu. Jak lze vidět již při natočení o úhel $\alpha = 13^\circ$ je chyba určení objemu 5%.

Skript pro výpočet objemových úbytků je uveden v Příloze A.4



Obrázek 5.28: Deformace stopy projektované na měřený objekt při pootočení projektoru (b) a v případě ideálního najustování sestavy (a).



Obrázek 5.29: Chyba určení objemu při natočení projektované stopy.

5.5.3 Odlišná osa jamky a osvitu

Tato chyba nastane za situace, kdy rovina osvitu prochází pomyslným středem jamky, ale její přímka vzniklá propojením středu jamky a optickým zdrojem není rovnoběžná s osou rotace měřené jamky. Výsledkem průniku jamky a světelné stopy je opět elipsa. V tomto případě se zkrátí poloosa a a ostatní b, c budou odpovídat poloměru původní koule. Situace bude obdobná jako v případě kapitoly 5.5.2.

5.5.4 Kombinace obou chyb

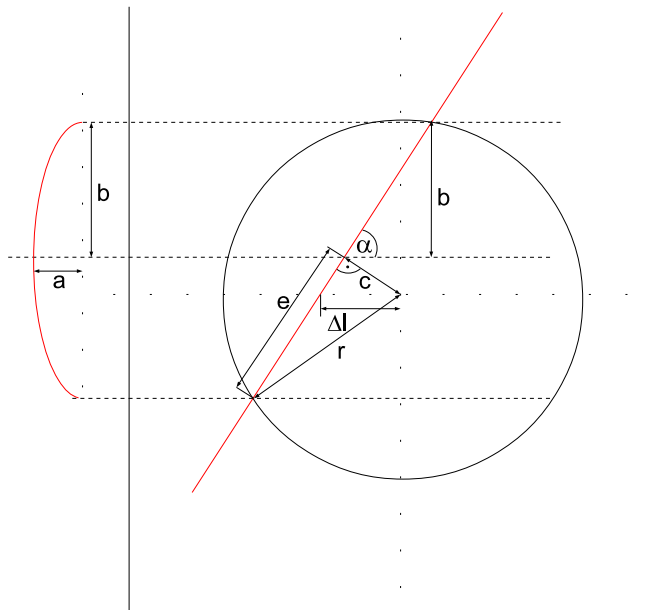
V posledním případě může nastat kombinace obou typů chyb. Dojde k posunu projektované stopy vůči ose rotace modelu a poté k jejímu natočení. V tomto případě se jedná již o složitější problém. Vznikne elipsa (viz obrázek 5.30) s posunutým středem vůči ose jamky. Velikost její poloosy b je dána vztahem:

$$b = \sin \alpha \sqrt{r^2 - (\sin \alpha \Delta d)^2}. \quad (5.50)$$

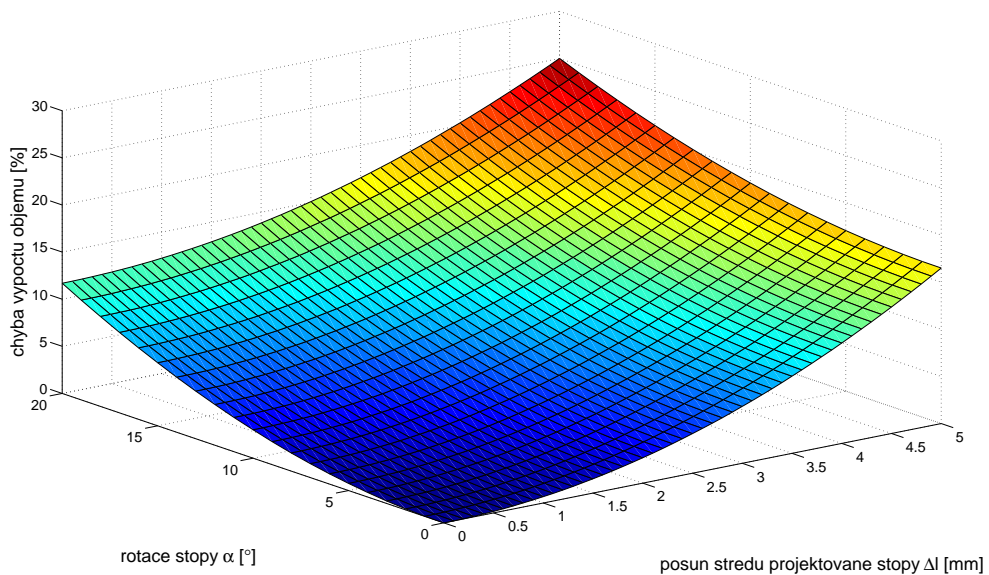
Druhá poloosa a se vypočítá jako $a = \sqrt{r^2 - \Delta l^2}$. Pak výsledný objem elipsoidu bude $V = 4/3\pi ab^2$ a výsledný objem modelu bude:

$$V = \frac{4}{3}\pi ab^2 + \pi v(b)^2. \quad (5.51)$$

Na obrázku 5.30 je vyjádřena závislost chyby výpočtu objemu při chybné justáži sestavy. Je patrný nárůst chyby při zvětšování Δl a α , chyba objemu do 5 % nastává v kombinaci posuvu Δl do 3 mm a současné rotace o úhel α do 10°.



Obrázek 5.30: Kombinovaná chyba justování sestavy (ilustrativní případ).



Obrázek 5.31: Vliv rotace a posunutí stopy na výslednou chybu stanovení objemu modelové jamky.

5.6 Experimentální sestava

Měřicí sestava je tvořena projektorem, digitální kamerou, posuvným stolkem, rotačním stolkem, řídicími kartami a řídicím počítačem. Měřicí proces je řízen z počítače pomocí programového prostředí LabView nebo Matlab. Vyhodnocení naměřených dat je prováděno pomocí programu Matlab. Skripty a zdrojové kódy jsou uvedeny a popsány v přílohách této práce. Geometrie experimentu je následující: zdroj tvořený laserovou diodou s emitovanou vlnovou délkou světla $\lambda = 520nm$ a válcovou čočkou je osazen čočkou s ohniskem 250 mm (pro zlepšení fokusace). Vytváří tenkou světelnou stopu, která je zobrazovaná na měřený objekt. Tento objekt je upevněn v rotačním stolku jehož osa rotace prochází laserovou diodou. Rotační stolec je dále umístěn na translačním stolku, přičemž směr posunu stolku je totožný s osou rotačního stolku. Translační stolec se používá pro kalibraci sestavy. Umožňuje posun předmětu směrem k a od světelného zdroje. Posledním prvkem sestavy je digitální kamera s objektivem.

5.6.1 Světelný projektor

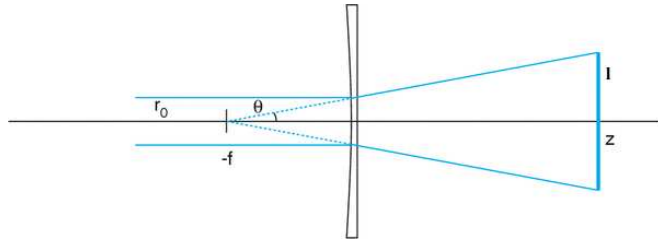
Projektor laserové světelné stopy je tvořen laserovou diodou se zabudovanou válcovou čočkou, rotačním stolkem (slouží k justáži sestavy) a čočkou s ohniskovou vzdáleností mm . Výkon laserové diody je v jednotkách mW . Projektor je možné provozovat v nekoherentním režimu. V tomto případě je však intenzita světla nižší než v koherentním módu.

Projektor lineární stopy

Metoda 3D skenovací topografie využívá projekce tenké dlouhé světelné stopy na povrch předmětu. Nejčastěji se používá modulace světla pomocí válcové čočky, u které je alespoň jeden její povrch tvořen částí válce. Při průchodu paprsků touto čočkou jsou ovlivňovány paprsky jen v rovině kolmé na osu tohoto válce. V druhé kolmé rovině, určené směrem chodu paprsků, se chod paprsků neovlivní (viz obrázek 5.32). Optická část je tvořena plano-konkávní válcovou čočkou s ohniskem f . Délka l stopy ve vzdálenosti z je dána vztahem:

$$l = 2\frac{r_0}{f}(z + f), \quad (5.52)$$

kde r_0 je průměr svazku použitého laserového zdroje. Projektovaná stopa bude mít gaussovský průběh intenzity a šířka stopy ve vzdálenosti z bude $2r_0$. Jelikož budeme chtít měnit tuto šířku, můžeme před nebo za tuto čočku umístit další válcovou čočku s ohniskem o velikosti $\cong z$. Ta bude fokusovat šířku ve vzdálenosti z a v kolmém směru paprsky neovlivní. V praxi je možné použít různé optické prvky pro tvarování projektované struktury.

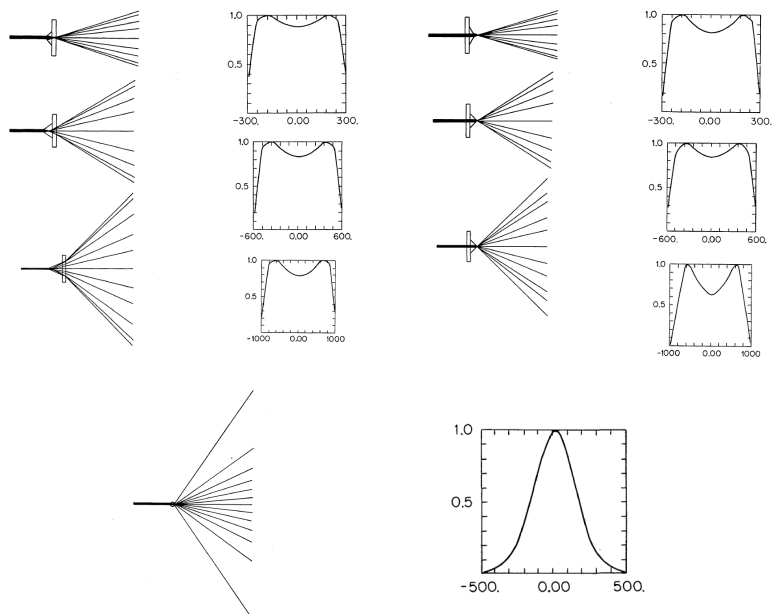


Obrázek 5.32: Projekce tenké laserové stopy pomocí expanze válcovou čočkou.

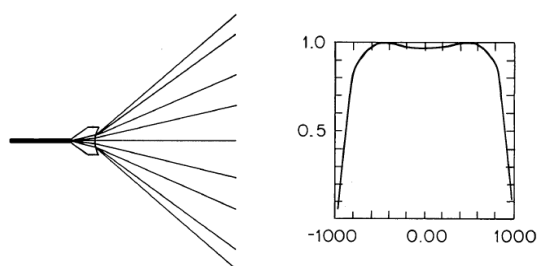
Obecně jsou označovány jako jednoosové expandéry, které ovlivňují paprsky pouze v jedné ose. Například [37] využívá expandéry s konickým povrchem popsáným rovnicí:

$$z = \frac{cy^2}{1 + [1 - (1 + Q)c^2y^2]^{1/2}}, \quad (5.53)$$

kde c je zakřivení plochy a Q je konická konstanta. Výsledný tvar má poté vliv na průběh intenzity po dané délce stopy l (viz obrázek 5.33) pro různé tvary a konfigurace expandérů ve vzdálenosti 1 m. Oproti projektoru s válcovou čočkou (spodní část obrázku 5.33) je v některých případech průběh intenzity příznivější (neklesá ke krajím stopy). Ještě lepší průběh nastane v kombinaci konicko-válcového tvaru expandéru (viz obrázek 5.34).



Obrázek 5.33: Různé typy a konfigurace expandérů pro tvorbu laserové stopy. Přičemž ke každé konfiguraci je znázorněn průběh intenzity podél této stopy ve vzdálenosti $1m$ od expandéru. Dole je podobná struktura vytvořená pomocí válcové čočky.



Obrázek 5.34: Expandér v kombinaci konicko-válcová plocha, průběh intenzity je přibližně konstantní podél stopy.

5.6.2 Rotační a translační motor

Systém využívá rotační motor PR50CC firmy Newport Corporation [38] s rozsahem rotace $0 \div 360^\circ$, s rozlišením $0,01^\circ$ a maximální rychlostí rotace $20^\circ s^{-1}$. Fotografie motor je na obrázku 5.35.



Obrázek 5.35: Rotační stolek PR50CC Newport Corporation (převzato z [38]).

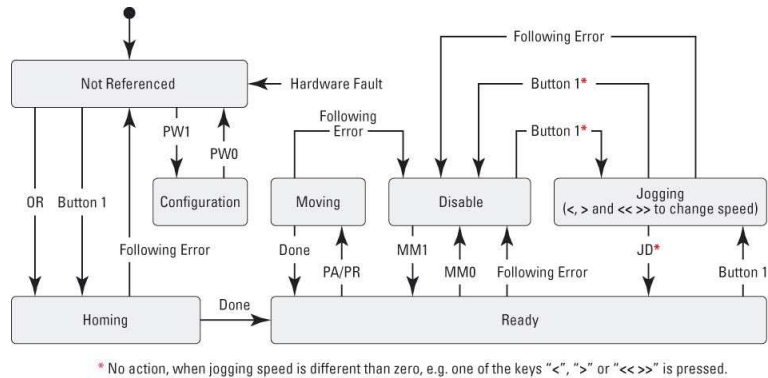
Lineární posuvný motor, používaný v našem experimentu je opět od stejné firmy Newport Corporation. Jedná se o typ ILS150CCL [39]. Délka posuvu u tohoto motoru je 150mm , rozlišení $0,5\mu\text{m}$ a rychlost posuvu je $50\text{mm}s^{-1}$. Fotografie motoru je na obrázku 5.36. Oba motory jsou řízeny pomocí dvou řídicích jednotek (pro každý motor jedna řídicí



Obrázek 5.36: Translační stolek ILS150CCL Newport Corporation (převzato z [39]).

jednotka) SMC100CC [40]. Komunikace počítače s těmito jednotkami je zprostředkována

pomocí sériového rozhraní RS-232-C. Základní schéma komunikace je na obrázku 5.37. Je možné využít ovladače pro vývojové prostředí LabView, nebo řídit jednotlivé motory pomocí příkazů posílaných přes sériový port.



Obrázek 5.37: Schéma komunikace a nastavení řídicí jednotky SMC100CC (převzato z [40]).

5.6.3 Záznamové zařízení

Jako záznamové zařízení byla zvolena digitální kamera LU 120M od firmy Lumenera Corporation [41]. Jedná se o 2/3" USB kameru s čipem CMOS, objektivovým závitem C-Mount. Rozlišení této kamery je 1280×1024 pixel, velikost plochy jednoho pixelu je $6,7 \times 6,7 \mu m^2$. Plocha čipu je $8,6 \times 6,9 mm^2$ (viz obrázek 5.38).



Obrázek 5.38: Obrázek kamery Lumenera série LU1xx. (převzato z [41]).

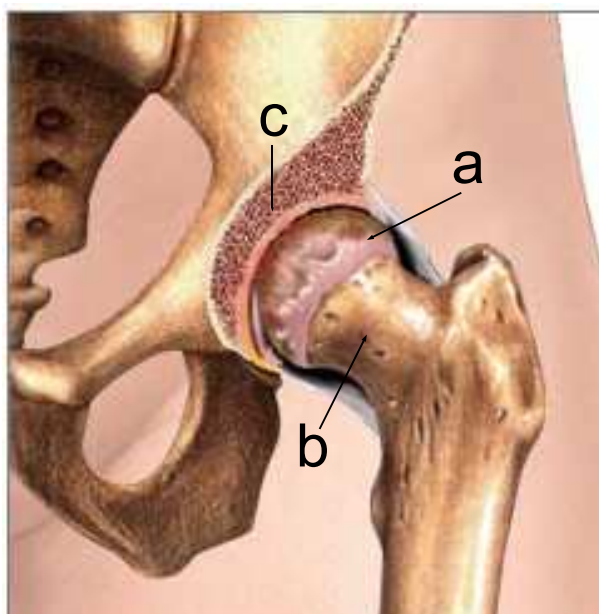
Kapitola 6

Měření opotřebení umělých kyčelních náhrad

Tato kapitola se věnuje problematice měření objemového úbytku polyethylenové jamky kyčelního implantátu. Nejprve jsou popsány standardní metody využívané v medicínské praxi. Následuje kontaktní měřicí metoda aplikovaná na měření lineárního otěru. V závěru jsou srovnány tři topografické metody umožňující měření objemového úbytku hmoty kloubních jamek.

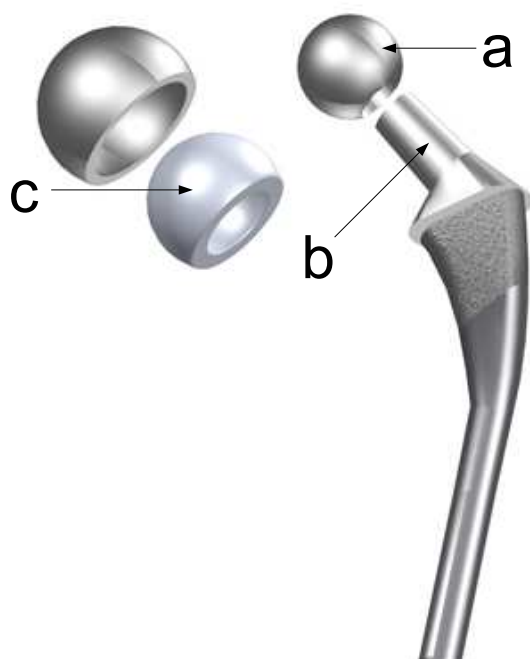
6.1 Kyčelní kloub

Kyčelní kloub je kulový kloub spojující stehenní kost s pánevní kostí. Na obrázku 6.1 je znázorněn tvar a popis kyčelního kloubu [42]. Kyčelní kloub se skládá z kyčelní jamky, kostní hlavice (hlava femuru) a krčku (krček femuru). Jedná se o jeden z nejvíce zatěžovaných velkých kloubů lidského těla. Vlivem mechanického tření částí a a b dochází k jejich opotřebení - koxartróze. Koxartróza [43] je označení pro degenerativní onemocnění kyčelního kloubu vznikající opotřebením kloubní chrupavky. Významným predispozičním faktorem těchto změn je vyšší věk, nadváha, opakované úrazy, záněty a přetěžování kloubu. V určitém stádiu této choroby je nutné přikročit k náhradě stávajícího kloubu umělým implantátem - endoprotézou. Na obrázku 6.2 je patrné složení a tvar náhrady. Sférická jamka je vyplněna optimálním materiálem. Do ní dosedá hlavice náhrady femuru. Nejčastěji



Obrázek 6.1: Kyčelní kloub. a - hlava femuru, b - kyčelní jamka, c - krček femuru
(healthguide.howstuffworks.com).

používané poloměry těchto sfér jsou 22mm, 28mm, 32mm.



Obrázek 6.2: Náhrada kyčelního kloubu. a - hlava femuru, b - kyčelní jamka, c - krček femuru (healthguide.howstuffworks.com).

Kyčelní implantát je jedna z největších náhrad velkých kloubů v lidském těle, které se v dnešní době provádějí. Aloplastika kyčelního kloubu patří k nejúspěšnějším chirurgickým zákrokům posledního století [44]. Dlouhý vývoj tohoto implantátu vytvořil náhradu relativně uniformního typu.

Úplně první implantát kyčelního kloubu byl operován v roce 1891 v Německu, kdy doktor T. Gluck provedl náhradu hlavy femuru pomocí slonoviny [45]. Nejznámějšími představiteli návrhu tvaru moderního kyčelního implantátu jsou J. Charnley a M. Müller. Vyvinuli kloub, který se používá s menšími obměnami dodnes. Jelikož jejich návrh pochází ze 60. let minulého století, je již v praxi využívána náhrada déle než půl století. Podle statistik dochází v české republice ročně v průměru k 12000 provedených náhrad, v USA je ročně provedeno téměř 500000 operací.

Nejčastěji používanými materiály pro náhrady kyčelního kloubu (krček femuru) jsou polymery a slitiny speciálně vyvinuté pro tento typ implantátů. Vlivem plastických defor-

mací a otěru materiálu implantátu dochází ke změnám tvaru a funkci tohoto implantátu. Po určité době, kdy je pacient sledován je nutné provést revizní operaci umělého kloubu. Dalším faktorem limitující životnost endoprotézy je tzv. "polyetylenová nemoc". Polyetylenový otěr se koncentruje a provokuje produkci granulační tkáně, která vzniká v místě kontaktu kosti s povrchem endoprotézy. S největší pravděpodobností není organismu schopen zbavit se otěru, což je příčinou tohoto nežádoucího jevu. Tento jev nastává i při použití kovové jamky a hlavice. V tomto případě je patrná alergická reakce na ionty kobaltu nebo karbonu produkované otěrem artikulačních ploch.

Jako ideální se jeví pro kontaktní plochu kombinace keramika-keramika. Nedochází k takovému otěru jako v případě kombinace polyetylén-kov. Nevýhodou je však křehkost a cena této kombinace materiálů. Životnost kyčelních implantátů je závislá na hmotnosti, věku pacienta, tělesné námaze a dalších parametrech a je odhadována v průměru na cca 10 let.

6.1.1 Stanovení velikosti otěru kyčelního implantátu

Výpočet objemového úbytku hmoty kloubní jamky má několik možných řešení dle autorů, kteří se vývoji metodiky výpočtu podíleli. Popis jednotlivých řešení je na obrázku 6.3. D. L. Charnley odvodil [46] pro požadovaný výpočet rovnici:

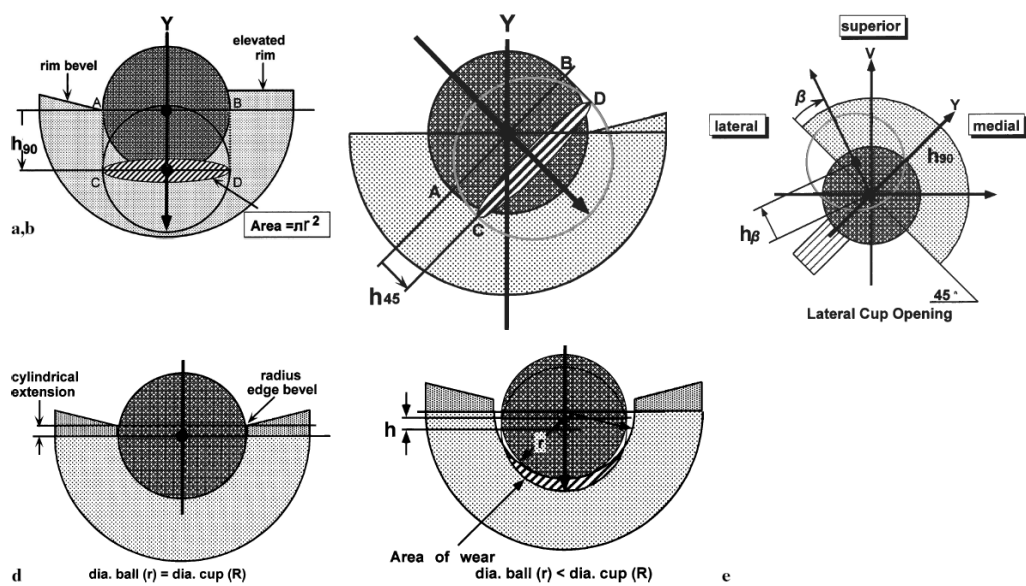
$$O = \pi r^2 h. \quad (6.1)$$

Ve skutečnosti je směr a trajektorie lineárního otěru mnohem komplikovanější. Další vztah pro výpočet objemového úbytku odvodili také J. M. Kabo [47]:

$$O = \pi r^2 h - r^2 \left[h \cos^{-1} \left(\frac{h \operatorname{tg}(\beta)}{r} \right) - \sqrt{\frac{r^2}{\operatorname{tg}^2(\beta)} - h^2} - \frac{r}{\operatorname{tg}(\beta)} \right] - \frac{r^3}{3 \operatorname{tg}(\beta)} \left[\left(1 - \frac{h^2 \operatorname{tg}^2(\beta)}{r^2} \right)^{3/2} - 1 \right] \quad (6.2)$$

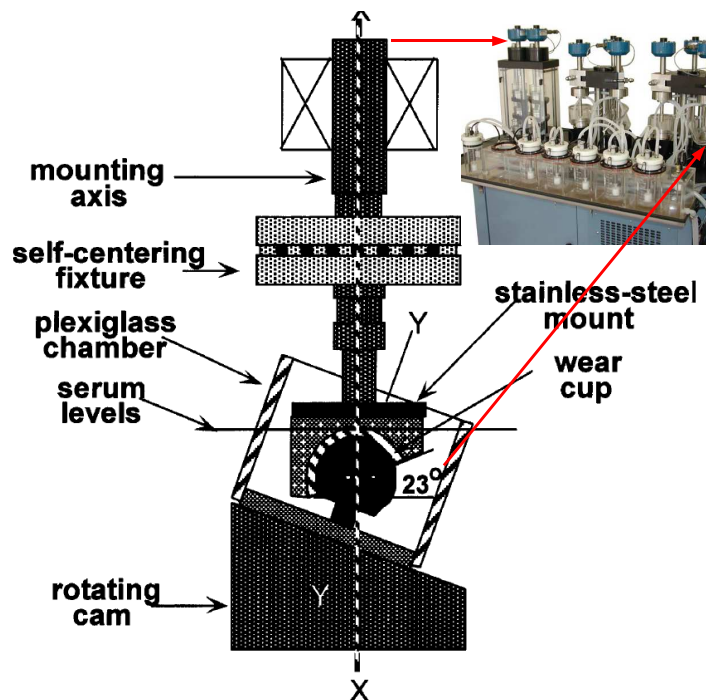
a J. Hashimoto publikoval v [48] výpočet pro objemový úbytek O následovně:

$$O = \frac{r^2 h}{2} (\pi + 2\beta + \sin 2\beta). \quad (6.3)$$



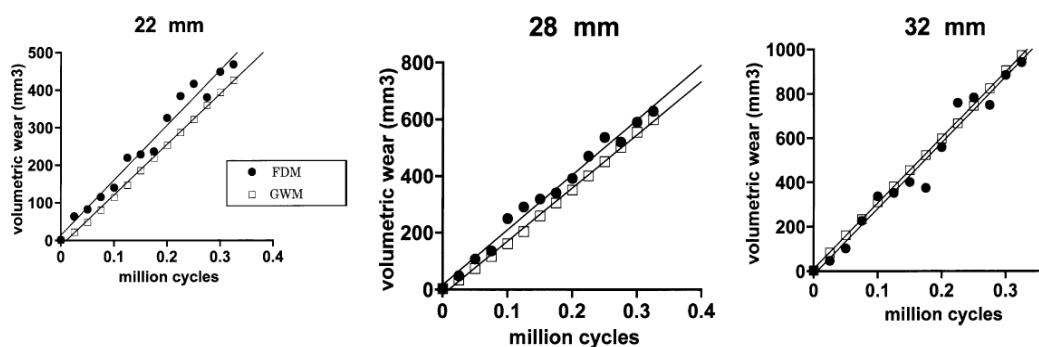
Obrázek 6.3: Metody pro stanovení velikosti otěru kloubního implantátu pro různé výpočetní přístupy. a - pro případ pohybu kloubní hlavice v ose Y , b - směr opotřebení není v ose Y , c - opotřebení dochází ve směru úhlu β - posun hlavice je dán vzdáleností h/β , d - poloměr hlavice femuru r je totožný s poloměrem jamky, e - poloměry jsou odlišné.

. Mizoue a jeho tým realizoval validaci jednotlivých výpočetních vztahů (6.1), (6.2), (6.3) na sérii testovacích jamek. Byla použita série několika jamek s poloměrem $22mm$, $28mm$, a $32mm$. K simulaci otěru byl navržen "hip simulator" (hip - kyčel) firmy Shore Western Manufacturer (viz obrázek 6.4) [49]. Parametry simulace byly nastaveny následně: působící síla $F = 2kN$, úhel $\beta = 23^\circ$, frekvence $f = 1Hz$. Simulátor byl vždy zastaven po 25000 cyklech, a následně bylo provedeno radiologické měření, měření pomocí gravimetrie (GWM) a metody měření objemového úbytku využívající znalosti vytlačeného množství kapaliny měřeným objektem ze známého objemu (fluid-displacement method - FDM). Data z radiologických měření byla použita ve vzorcích (6.1), (6.2), (6.3) a porovnána s metodami GWM a FDM (viz obrázky 6.5), 6.6.

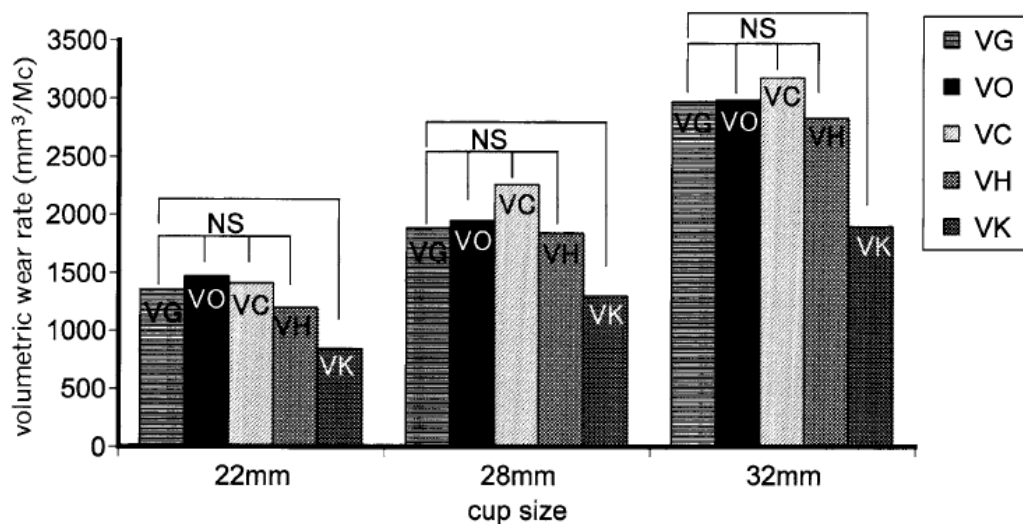


Obrázek 6.4: Simulátor otěru kyčelního implantátu firmy Shore Western Manufacturer, úhel působící síly $F = 2kN$ byl zvolen $\beta = 23^\circ$ a frekvence otěru $f = 1Hz$.

Z obrázku 6.6 je patrné, že shoda metod stanovení objemového úbytku GWM a FDM je větší pro velké průměry kloubních jamek. Při porovnání výpočtových metod je patrné, že nejvýhodnější [46] je použití vzorce (6.3) pro výpočet objemového úbytku.



Obrázek 6.5: Úbytek hmoty v simulátoru pro jamky velikostí 22mm, 28mm a 32mm a vyhodnocení pomocí metod GWM a FDM.



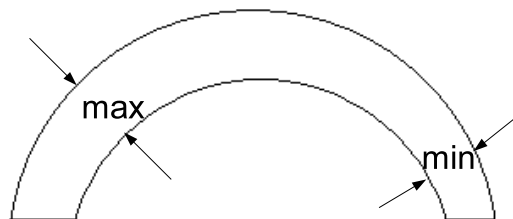
Obrázek 6.6: Srovnání metod vyhodnocení otěru kyčelních implantátů pomocí metod: VG - GWM, VO - FDM, a výpočtových algoritmů (viz rovnice VC, VH, VK), (6.1), (6.3), (6.2).

6.2 Metody stanovení velikosti otěru in vivo

Velikost otěru in vivo se stanovuje na základě analýzy rentgenového snímku implantátu pacienta. Velice často se sleduje průběh opotřebení v čase, který je důležitý pro studium evoluce opotřebení daného implantátu. Výpočet úbytku objemu je počítán ze vzájemného posunu původního středu hlavice femuru v kloubní jamce vůči situaci v době expozice rentgenu.

6.2.1 2D radiometrické měření

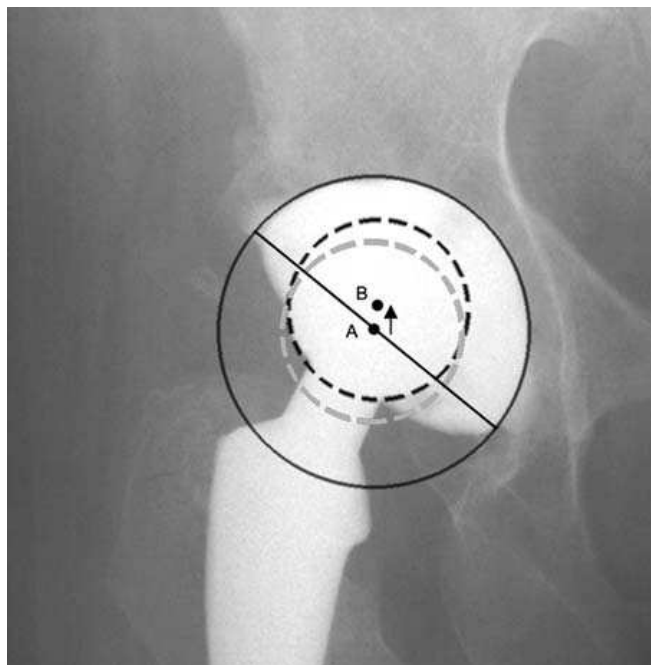
Radiologickou 2D metodu lze dále dělit na dvě další metody. První využívá jeden rentgenový snímek kyčelní náhrady [50]. Opotřebení se počítá z rozdílu minimální a maximální tloušťky stěny kyčelní jamky (viz obrázek 6.7). Předpokládá se, že neopotřebovaná část jamky má původní tloušťku stěny, tato velikost bude rovna maximální hodnotě určené pro výpočet. Minimální hodnota odpovídá pozici s největším opotřebením. Nevýhodou metody je fakt, že se předpokládá opotřebení pouze v jednom směru rovnoběžném s osou symetrie kloubní jamky. Tato metoda byla dlouho používána jako standard pro stanovení otěru jamky. Nejistota stanovení lineárního otěru byla při použití metody $\pm 0.5mm$.



Obrázek 6.7: Výpočet otěru kyčelní jamky pomocí metody J. Charnley, pro stanovení velikosti pro výpočet se určí maximální a minimální tloušťka jamky.

Druhá metoda využívá k stanovení otěru analýzu více snímků. Porovnávají se rentgenové snímky opotřebované kloubní jamky se situací krátce po operaci (před opotřebením). Posuzuje se posunutí hlavice kloubu vůči zadní (neartikulační ploše) kloubní jamky. Výhodou je porovnání neopotřebované jamky a stávajícího opotřebení. V praxi se používají

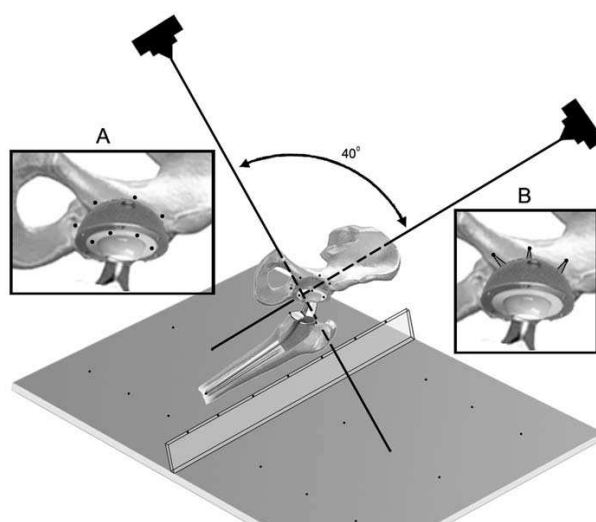
i počítačem asistované analýzy, kdy se snímek převede do počítače a parametry otěru se stanoví pomocí obrazové analýzy snímku a výpočtu příčných vstupních parametrů. Aplikace 2D radiometrické metody v praxi je patrná na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Stanovení lineárního opotřebení kyčelní jamky. Pomocí obrazové analýzy jsou lokalizovány dvě pozice středu kloubní hlavice A, B a pomocí měřítka je spočítán lineární posun obou pozic, který se poté použije pro výpočet objemového úbytku [51].

6.2.2 3D radiometrické měření

Jsou založená na počítačové analýze několika radiologických snímků téhož implantátu. Ze znalostí vzájemné polohy jednotlivých rentgenových profilů se pomocí automatické, nebo asistované metody vytvoří model jamky a hlavice femuru a pomocí speciálních algoritmů se spočítá úbytek hmoty kloubní jamky. Chyba lineárního opotřebení je v případě této metody udávána $\pm 0,15\text{mm}$. V praxi se též používají speciální terčíky (markery), které jsou součástí jak kloubní jamky, tak kovového úchyty kloubní jamky v pánevní kosti. Při rentgenovém snímku vytvoří kontrastní body, pomocí nichž lze přesně lokalizovat pozici kyčelní jamky a hlavici femuru (viz obrázek 6.9).

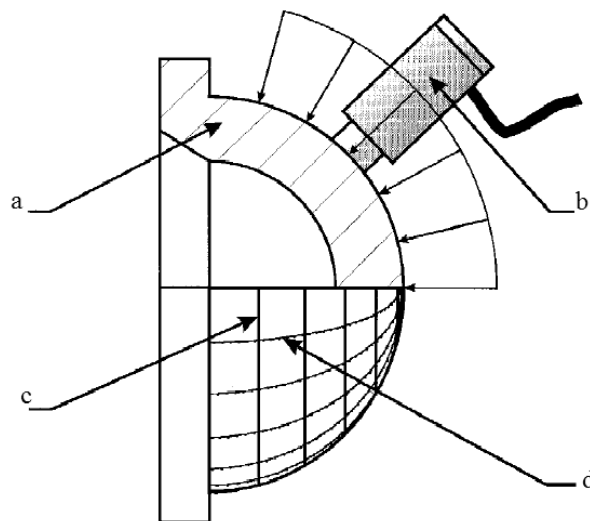


Obrázek 6.9: Použití speciální markerů pro stanovení přesné pozice jednotlivých komponent kyčelního implantátu [51].

6.3 Metody stanovení velikosti otěru in vitro

6.3.1 Ultrazvuková měření

Jednou z metod pro posouzení úbytku hmoty kloubního implantátu in vitro je ultrazvuková metoda. Využívá se ultrazvuku pro měření tloušťky stěny polyetylenové jamky. Srovnává se tloušťka použité a nepoužité jamky. Výsledkem je topografická mapa jamky, ze které se vypočítá lineární otěr na základě posunu hlavice femuru. Z jeho znalosti se poté spočítá objemový úbytek. A. Berzins [52] provedl měření na sérii nových a poškozených jamek pomocí ultrazvukového tloušťkoměru firmy Panametrics, modelu 25DL, s pomocí přesného polárního krokovacího stolku s krokem 15° . Jamka byla rozdělena na 144 měřených bodů, ve kterých se měřila tloušťka stěny s přesností $\pm 13\mu m$. Povrch kloubní jamky byl tedy rozdělen na 144 šestistěnů s danou podstavou a výškou rovnou naměřené hodnotě. Chyba stanovení objemového úbytku je udávána v řádu procent. Princip měření je na obrázku 6.10.



Obrázek 6.10: Ultrazvukové měření objemového úbytku hmoty kyčelního implantátu s krokem $15 \times 15^\circ$.

a - měřená jamka, b - ultrazvukové zařízení, c - elevace, d - azimut.

6.3.2 Gravimetrie

Metoda gravimetrie je založená na zkoumání úbytku hmotnosti implantátu během používání kloubní náhrady v lidském těle. Ze znalosti hustoty materiálu [53] použitého pro výrobu jamky a změny hmotnosti lze odvodit jednoduchý vztah pro výpočet objemového úbytku hmoty jamky:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}, \quad (6.4)$$

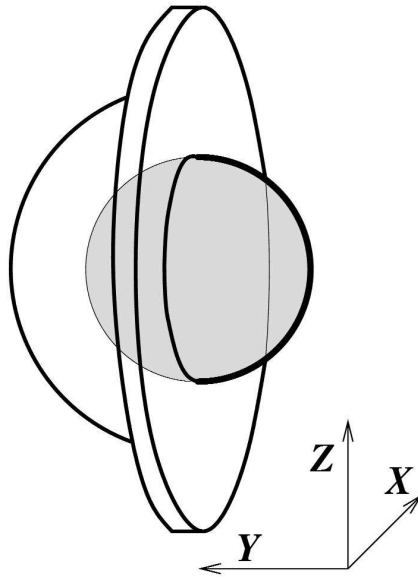
kde ΔV je počítaná změna objemu, Δm je změřený úbytek hmotnosti a ρ je hustota materiálu použitého implantátu. Nevýhodou této metody je nutný předpoklad homogenity materiálu. Další nevýhodou je neznalost charakteru a tvaru opotřebené jamky a necitlivost na plastickou deformaci. První negativum lze eliminovat použitím měřeného média. Známé množství kapaliny s definovanou hustotou vlijeme do kádinky s jamkou a doplníme až po okraj. Poté vložíme do této kapaliny měřenou jamku a změříme objem přebytečné kapaliny vytlačené jamkou. Poté vypočítáme objem jamky. Stejně postupujeme v případě použité jamky. Tato metoda je používána pouze jako srovnávací k ostatním používaným metodám. Je dokonce standardizovaná ve formě normy ISO 14242-2:2000 "Implants for surgery". Přesnost této metody je $\pm 0,1mg$.

6.3.3 Měření pomocí kontaktní metody

Historicky první měření úbytku hmoty extrahovaných jamek ABG 1 totální endoprotézy kyčle (TEP) [54] bylo provedeno pomocí univerzálního měřicího mikroskopu (viz kapitola 4.1.1). Měřeny byly náhodně vybrané jamky ABG 1, které byly extrahovány na Ortopedické klinice LF UP a FN Olomouc. Jamky byly po vyjmutí z těla mechanicky očištěny a sterilizovány v roztoku Sekusept Aktiv. Vnitřní plášť opotřebených jamek připomíná miskou ve tvaru dvou na sebe navazujících částí kulových ploch. První je původní výrobní plocha a druhá je nově vytlačená poloha vlivem působení kloubní hlavičky. Ta má v obou polohách zpravidla zanedbatelnou vůli. Jestliže pro zjednodušení vyloučíme podíl plastické deformace polyetylénu, měl by posun středů obou koulí vepsaných do jamky jednoznačně odpovídat lineárnímu úbytku materiálu polyetylénové jamky. Ke stanovení lineárního úbytku potřebujeme najít středy těchto koulí, jejichž poloměr známe. Potřebujeme tedy

znát minimálně 4 body, které neleží v jedné rovině. Kompromisem jsme nakonec zvolili 9 takových bodů

Body jsme umístili do vrcholů pravoúhlé sítě $Y - Z$. Trojice bodů leží vždy v jedné rovině rovnoběžné s osou Y . Celkem tedy máme tři roviny, které protínají kouli hlavičky, každá trojice je spolu rovnoběžná a rovněž rovnoběžná s osou Y případně Z (viz obrázek 6.11). Za těchto okolností se nabízí možnost vypočítat ze souřadnic bodů třikrát polohu (x, y) středu kružnice tvořené průsečíkem koule a příslušné roviny a stejně tak třikrát polohu středu (z, y) . Tyto souřadnice potom korespondují se souřadnicemi středu koule. Univerzálnějším postupem je určení parametrů koule, jejíž povrch má minimální kvadratickou odchylku od naměřených bodů. Průměrování (první metoda nalezení středů kružnic) je výpočetně méně náročná, ovšem minimální odchylka (druhá metoda stanovení středu koule) umožňuje zpracovat i obecné rozložení bodů mimo pravoúhlou síť. Průměr safírové kuličky měřicí sondy je $3mm$. Přesnost odečítání je v řádu μm .



Obrázek 6.11: Orientace souřadných os vzhledem k poloze jamky.

Výpočet objemového úbytku je rovněž založen na předpokladu, že nenastává stlačení ani tečení polyethylenu. Dále předpokládáme, že objem jamky tvoří dvě vzájemně posunutě koule stejného poloměru, mezi nimiž je ostrý přechod. Úbytek (objemový otěr) se potom rovná rozdílu vnitřních objemů opotřebované (vyjmuté) a původní jamky. Vzhledem ke složitějšímu tvaru provádíme výpočet numericky s volbou integračního kroku k

a rozdělením jamky rovinami Z na řezy r . Pro malé k považujeme proužek za úsečku, jejíž koncové body určíme z parametrů obou koulí, vypočítáme její délku l . Úsečce přiřadíme elementární objem lk^2 a sečteme jej pro všechny proužky všech rovin. Důležitá je volba parametru k . Zmenšováním kroku roste přesnost výpočtu, ale výrazně narůstá výpočetní čas.

Postup měření

Měření posunu středů vepsaných polokoulí bylo provedeno na univerzálním měřicím mikroskopu (Carl Zeiss Jena) nepřímým způsobem. Do jamky vložíme kloubní hlavičku a vhodně ji zařídíme nejprve v poloze před poškozením a poté ve druhé poloze (viz obrázek 6.12). Zrcátkovou sondou o odečtem zjistíme prostorové souřadnice vybrané sítě bodů na povrchu obou uvedených poloh. Tyto body jsou na kulovém vrchlíku vně jamky. Průměry extrahovaných kovových hlaviček jsme měřili mikrometrem se setinovou přesností. Medián velikosti hlaviček byl $27,98mm$ při měřeném intervalu $27,94 \div 27,99mm$. Z měření byly vyloučeny extrémně poškozené jamky, měřili jsme tedy jamky se zachovanou polyetylenovou vložkou.

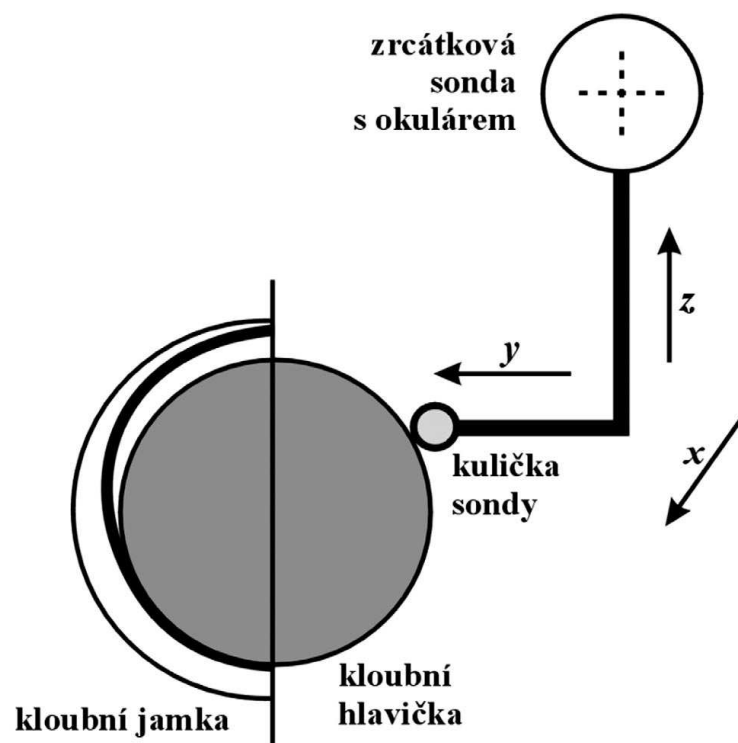
Výpočet průměru a polohy středu koule

Tyto parametry vypočítáme pomocí metody nejmenších čtverců. Měřené koule mají střed v bodě X, Y, Z a mají poloměr R . Kouli popsát rovnicí:

$$(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 - R^2 = 0, \quad (6.5)$$

kde x_i, y_i, z_i jsou souřadnice bodů ležící na povrchu koule. Pokud však tyto body nebudou ležet na povrchu koule, pravá strana není rovna nule. Bude rovna nové funkci $f(X, Y, Z, R)$. Po umocnění na druhou a sumaci pro všechny body i až N dostaneme na pravé straně rovnice N násobek střední kvadratické odchylky všech N bodů od koule. Tuto funkci označíme $F(X, Y, Z, R)$. Hledáme tedy minimum této funkce. Provedeme parciální derivace funkce podle X, Y, Z, R . Například pro parciální derivaci funkce F podle X platí:

$$\sum [(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 - R^2] (x_i - X) = 0, \quad (6.6)$$



Obrázek 6.12: Princip měření otěru jamky pomocí univerzálního měřicího mikroskopu. Z obrázku lze vypočítat pozici kloubní hlavičky nepoškozené jamky a vtisk vytvořený opotřebením (nad hlavičkou).

Hlavička má tedy dvě "stabilní" polohy. Do obou lze vložit hlavičku a měřit její pozici.

Následně provedeme parciální derivaci druhého řádu funkce F podle X a R :

$$\frac{\delta^2 F(X, Y, Z, R)}{\delta X^2} = 4 \sum [3(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 - R^2], \quad (6.7)$$

$$\frac{\delta^2 F(X, Y, Z, R)}{\delta R^2} = 4 \sum [-(x_i - X)^2 - (y_i - Y)^2 - (z_i - Z)^2 - 3R^2]. \quad (6.8)$$

Srovnáním výrazu (6.5) s (6.8) zjistíme, že je nezáporný (vyjma $x_i = X$ a jedna se tedy o minimum funkce $F(X, Y, Z, R)$). Po úpravách rovnic typu (6.6) pro X, Y, Z, R dostaneme podmínky pro výpočet parametrů rovnice:

$$\begin{aligned} a_x &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum x_i \right) - \sum x_i^2 \right], \\ a_y &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum y_i \right) - \sum y_i^2 \right], \\ a_z &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum z_i \right) - \sum z_i^2 \right], \\ b_x &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum y_i \sum z_i - \sum y_i z_i \right) \right], \\ b_y &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum x_i \sum z_i - \sum x_i z_i \right) \right], \\ b_z &= 2 \left[\frac{1}{N} \left(\sum y_i \sum x_i - \sum y_i x_i \right) \right], \\ c_x &= \frac{1}{N} \sum x_i \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2 + \sum z_i^2 \right) - \sum x_i^3 - \sum x_i y_i^2 - \sum x_i z_i^2, \\ c_y &= \frac{1}{N} \sum y_i \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2 + \sum z_i^2 \right) - \sum y_i^3 - \sum y_i x_i^2 - \sum y_i z_i^2, \\ c_z &= \frac{1}{N} \sum z_i \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2 + \sum z_i^2 \right) - \sum z_i^3 - \sum z_i x_i^2 - \sum z_i y_i^2, \\ d &= a_x a_y a_z + b_x b_y b_z - a_x b_x^2 - a_y b_y^2 - a_z b_z^2 \\ X &= (c_x a_y a_z + c_y b_x b_y + c_z b_x b_z - c_x b_x^2 - c_z a_y b_y - c_y a_y b_z) / d, \\ Y &= (c_y a_x a_z + c_z b_y b_z + c_x b_x b_y - c_y b_y^2 - c_x a_z b_z - c_z a_y b_y) / d, \\ Z &= (c_z a_x a_y + c_y b_y b_z + c_x b_x b_z - c_z b_z^2 - c_x a_y b_y - c_y a_x b_x) / d, \\ R &= \sqrt{\frac{1}{N} [(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2]}. \end{aligned}$$

Odchylku poloměru určíme ze vztahu:

$$o_i = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 - R^2}, \quad (6.9)$$

kde R'^2 je poloměr vypočítaný metodou nejmenších čtverců. Pro výpočet těchto výše uvedených parametrů byl v programu Matlab sestaven program, jehož skript je uveden Příloze A.3 této dizertační práce.

Při určení spolehlivosti a objektivit navržené metodiky bylo využito opakovaných měření několika jamek v oddělených časových intervalech. Míru spolehlivosti lze poté stanovit zhodnocením konzistence získaných výsledků na základě dvou přístupů:

1. Reprodukovatelnost odlišných principů získávání výsledků.
2. Stanovení shody mezi měřeními jednoho objektu jednou osobou, resp. několika osobami.

Ad 1) Pro stanovení přesnosti a reprodukovatelnosti obou variant výpočtu (pomocí průměru kružnic a minimální odchylky koule) jsme vybrali jednu jamku a změřili ji 6krát, vždy s novým upevněním a s různými polohami měřených bodů. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Ad 2) V průběhu jednoho měsíce bylo provedeno celkem sedm měření deseti vybraných jamek podle stejné metodiky. Čtyři měření provedl jeden pozorovatel (VH), nezávisle na něm provedla tři měření další osoba (DM).

č. m	Průměr kružnic		Minimální odchylka		Rozdíl posunů
	P [mm]	Δ [μm]	P [mm]	Δ [μm]	[mm]
1	2,165	2	2,158	1	0,007
2	2,172	2	2,173	2	-0,001
3	2,130	2	2,128	2	0,002
4	2,073	2	2,074	2	-0,001
5	2,115	1	2,110	1	0,005
6	2,061	1	2,059	1	0,002
Průměr	2,119	46	2,117	45	0,002

Tabulka 6.1: Tabulka měření jedním pozorovatelem. Vyhodnocení pomocí měření metodou stanovení posunutí dvou kružnic (**Průměr kružnice**) a výpočet posunutí dvou koulí (**Minimální odchylka**). P je vypočtený lineární otěr (lineární posun kloubní hlavičky femuru), Δ je nejistota měření.

V tabulce 6.2 je srovnání měření dvou nezávislých pracovníků, vyhodnocení bylo provedeno nezávislými programy.

	N	Min-Max	Průměr	Medián	S.D.
pracovník č.1					
1. měření	10	0,215 - 2,987	1,801	2,173	0,883
2. měření	10	0,245 - 3,160	1,829	2,157	0,891
3. měření	10	0,249 - 3,111	1,787	2,114	0,897
4. měření	10	0,255 - 3,151	1,783	2,154	0,910
pracovník č.2					
1. měření	10	0,259 - 3,133	1,851	2,129	0,989
2. měření	10	0,297 - 3,146	1,804	2,183	0,888
3. měření	10	0,281 - 3,180	1,833	2,214	0,913

Tabulka 6.2: Tabulka nezávislých měření dvou pozorovatelů VH - Vítězslav Havránek, DM - Dušan Mandát . Byly provedeny 3 sady měření během jednoho měsíce. V každé sadě bylo 10 jamek, které byly pro každou sadu stejné. parametr S.D. udává směrodatnou odchylku (Standard Deviation).

Korelační analýza prokázala velmi silnou závislost mezi výsledky jednotlivých měření u jednoho posuzovatele (minimální – maximální korelace 0,988 ÷ 0,998, resp. 0,973 ÷ 0,997). Vysokou míru shody potvrdilo překrývání regresní přímky s přímkou ideální. Analýza jednotlivých měření pomocí párového t-testu neprokázala statisticky významné rozdíly ani u prvního ani u druhého posuzovatele ($p = 0,182$ až $p = 0,853$, resp. $p = 0,218$ až $p = 0,793$). Pomocí korelační analýzy byla také prokázána velmi vysoká závislost mezi měřeními jednoho objektu různými posuzovateli (minimální – maximální korelace 0,959 ÷ 1,000).

Pomocí párového t-testu byl ale mezi oběma posuzovateli zjištěn statisticky významný rozdíl v průměrných hodnotách 3. měření ($p = 0,048$) a dále v průměrných hodnotách 4. měření prvního posuzovatele a 3. měření druhého posuzovatele ($p = 0,028$). Statisticky významný rozdíl však nebyl zjištěn v průměrných hodnotách naměřených oběma posuzovateli ($p = 0,331$). Nevýhoda měření touto metodou se však projevila při validaci optických topografických metod. Jak je rovněž popsáno v kapitole 6.4 není možné tuto

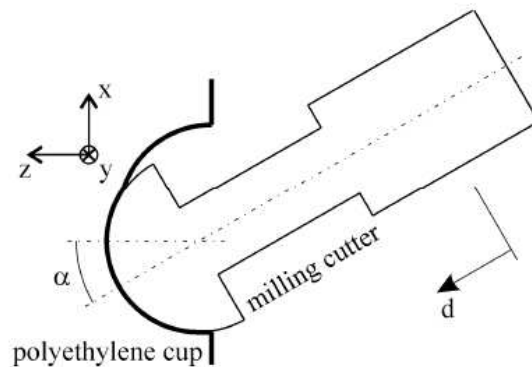
metodu použít pro případy, kdy směr lineárního otěru je blízky ose symetrie jamky.

6.4 Porovnání vybraných topografických měřicích metod při měření in vitro

Při výběru vhodné měřicí metody pro stanovení velikosti úbytku hmoty kloubních implantátů byly brány v potaz tři topografické metody.

1. Měření pomocí optického měřicího mikroskopu.
2. Měření pomocí Fourierovy profilometrie.
3. Měření pomocí 3D optické skenovací profilometrie.

Jako testovací objekt byla posloužila kyčelní jamka. Nebyly však proměřovány reálně opotřebované kloubní implantáty, ale nové jamky, které byly pro srovnávací měření definovaně poškozeny. Tento experiment byl součástí výzkumného úkolu COST OC168. [55]. Nejprve byly provedeny simulace poškození a vypočítány úbytky hmoty pro různé vstupní parametry. Poté proběhlo obrábění jamky pomocí kulové frézy s průměrem totožným s průměrem kovové hlavy kyčelního implantátu. Těmito vstupními parametry byl úhel α , pod kterým se jamka obráběla a hloubka d odebrání materiálu. Princip obrábění je patrný z obrázku 6.13.



Obrázek 6.13: Způsob umělého definovaného opotřebování jamky kyčelního implantátu v závislosti na vstupních parametrech α a d .

Jako vstupní hodnoty porovnání jednotlivých metod byly brány hodnoty jednak výpočtové, a také hodnoty změřené pomocí gravimetrie.

6.4.1 Gravimetrické měření

Tato metoda byla využita díky její jednoduchosti a z předpokladu znalosti průměrné hustoty měřených jamek $\rho = 944 \text{ kg/m}^3$ a jejich hmotnosti před definovaným poškozením. Daná hustota byla zjištěná měřením souboru 10 jamek v chemické laboratoři. Metoda spočívá ve výpočtu změny objemu pomocí známého rozdílu hmotnosti zkoumaného předmětu. Měřené jamky byly zváženy nejprve před obráběním na přesných váhách a poté za stejných podmínek zváženy po jejich obrobení a odebrání materiálu. Tato měřicí metod avšak oproti výpočetní metodě však skrývá jednu podstatnou nevýhodu, která se ukázala až v průběhu experimentu. V některých případech může dojít ke kompresi materiálu samotné jamky při obrábění. V tomto případě dochází ke změně objemu kloubní jamky, což je náš zkoumaný parametr, avšak nedojde k mechanickému odebrání materiálu z obráběného předmětu. To znamená, že hmota která měla být odebrána zůstává nadále v jamce a dochází k rozdílu výpočtového postupu a měření pomocí gravimetrie. Při reálném opotřebení jamky v těle pacienta nastává tato situace taktéž. Proto byla tato metoda již od začátku vyloučena pro stanovení objemového úbytku kloubního implantátu.

6.4.2 Výpočetní metoda

Vstupním parametrem pro srovnávací měření byl zvolen výpočet objemového úbytku při obrábění. Výpočet byl proveden v programovém prostředí Matlab. Jako vstupní parametry výpočtu byly použity veličiny α a d . V tabulce 6.3 jsou uvedeny hodnoty použité při obrábění.

úhel α [°]	0	0	0	30	30	30	50	50	50
délka d [mm]	0.5	1.5	1	0.5	1.5	2	0.5	1.5	2.5

Tabulka 6.3: Parametry výpočtu objemového úbytku a vstupní parametry pro obrábění měřených jamek.

Výpočet teoretického úbytku materiálu se prováděl tak, že se počítal vrchlík koule, která vznikla vyfrézováním materiálu v jamce kyčelního implantátu a poté se počítal rozdíl objemu původní jamky a nově vzniklého úbytku. Parametry opracování jamky byly zvoleny z dřívějších měření pomocí optického měřicího mikroskopu. Poslední úhel v tabulce

6.3: $\alpha = 50^\circ$ byl zvolen jako extrémní hodnota a sloužil k zjištění limitů jednotlivých metod.

6.4.3 Vstupní parametry opotřebení kloubních implantátů

Výsledky měření objemového úbytku pomocí gravimetrie a výpočty v programu Matlab jsou uvedeny v tabulce 6.4. V tabulce 6.5 jsou vidět rozdílné výsledky objemových úbytků

	α [°]	0			30			50		
Metoda	d [mm]	0.5	1.5	1	0.5	1.5	2	0.5	1.5	2.5
výpočet	ΔV [mm ³]	307.6	922.9	1230.5	288.8	580.1	1171.6	254.6	773.7	1305.3
gravimetrie	ΔV [mm ³]	253.4	865.5	1147.6	259.5	510.6	1084.6	234.3	730.0	1269.2

Tabulka 6.4: Naměřené a vypočtené objemové úbytky pro dané metody.

při využití obou metod. Příčina je vysvětlena v předchozím textu.

6.4.4 Srovnávací měření

Při porovnání několika vhodných topografických metod byly zvoleny dvě optické bezkontaktní metody a jedna kontaktní měřicí metoda. Výsledky jednotlivých metod jsou uvedeny v tabulce 6.5. Z tabulky je patrné, že pro malé úhly obrábění nelze použít me-

	α [°]	0			30			50		
Metoda	d [mm]	0.5	1.5	1	0.5	1.5	2	0.5	1.5	2.5
GM	ΔV [mm ³]	253.4	865.5	1147.6	259.5	510.6	1084.6	234.3	730.0	1269.2
MM	ΔV [mm ³]	-	-	-	-	316.0	484.0	222.0	620.0	1263.0
3D SP	ΔV [mm ³]	268.3	843.7	1197.6	276.4	465.2	998.7	218.5	658.0	1224.1
FP	ΔV [mm ³]	278.0	911.4	1226.7	281.6	495.8	1136.7	241.5	719.0	1238.7

Tabulka 6.5: Srovnání vybraných topografických metod při měření úbytku materiálu jamky kyčelního implantátu. GM - gravimetrie, MM - měřicí mikroskop, 3D SP - 3D skenovací profilometrie, FP - Fourierovská profilometrie.

todu měření pomocí měřicího mikroskopu. Toto omezení je dané principem měření, jelikož není možné určit počáteční tvar jamky. Se zvětšujícím se úhlem α je již možné tuto metodu použít, protože lze identifikovat původní tvar a pozici hlavice kloubu vzniklou

obrobením jamky. Zbývající dvě metody lze použít pro všechny parametry obrábění. Lepších výsledků dosahuje Fourierovská profilometrie (FP). Relativní odchylky jednotlivých měření také ukazují na přesnější měření pomocí FP. Nevýhodou pro toto měření je podstatně složitější zpracování výsledků a vyhodnocení měření. Tato metoda využívá projekci periodické struktury na zkoumaný předmět. V případě osvětlení z většího úhlu dochází k zastínění projektované struktury hranou jamky a tím ke ztrátě informace o tvaru povrchu. V případě pozorování zkoumaného předmětu dojde k zastínění pozorované scény hranou jamky. Tento případ je však typický pro opotřebení, kdy úhel α nabývá hodnot větších jak 20° a hloubce d od 0.5mm , což odpovídá typickému poškození implantátu v lidském těle. Relativní vzájemné odchylky měření jednotlivých metod jsou uvedeny v tabulce 6.6:

	α [°]	0			30			50		
Metoda	d [mm]	0.5	1.5	1	0.5	1.5	2	0.5	1.5	2.5
MM	odchylka [%]	-	-	-	-	-38.1	-55.4	-5.2	-15.1	-0.5
3D SP	odchylka [%]	5.9	-2.5	4.4	6.5	-8.9	-7.9	-6.7	-9.9	-3.6
FP	odchylka [%]	9.7	5.3	6.9	8.5	-2.9	4.8	3.1	-1.5	-2.4

Tabulka 6.6: Relativní odchylky jednotlivých metod měření od gravimetrie. MM - měřicí mikroskop, 3D SP - 3D skenovací profilometrie, FP - Fourierovská profilometrie.

Limitující pro FP je počáteční orientace měřené jamky. Pokud dojde k optimální konfiguraci celé sestavy, kdy nedochází k žádnému zakrytí projektované struktury a měřeného objektu, je tato metoda optimální pro měření. V tabulce 6.7 je uvedeno několik měření stejné jamky s různou počáteční orientací. Poté se s jamkou rotovalo o náhodný úhel kolem její hlavní osy a měřila se její topografie a počítal úbytek hmoty z tvaru jamky.

Metoda		pozice 1	pozice 2	pozice 3	pozice 4	pozice 5	σ [%]
3D SP	ΔV [mm ³]	462.8	454.7	458.3	463.8	471.2	1.3
FP	ΔV [mm ³]	506.1	443.8	428.4	492.5	458.8	7.0

Tabulka 6.7: Směrodatná odchylka σ jednotlivých metod měření od gravimetrie. MM - měřicí mikroskop, 3D SP - 3D skenovací profilometrie, FP - Fourierovská profilometrie.

Z výsledků uvedených v tabulce 6.7 je patrné, že při opakování měření dochází k relativně velkému rozptylu naměřených hodnot u FP. Proto byla tato metoda označena jako nevhodná pro daný typ použití. Měřicí mikroskop (MM) byl také vyloučen, jelikož se jedná o metodu kontaktní (je nutné zabezpečit co nejmenší interakci zkoumané jamky s cizími předměty, vzhledem k dalším analýzám). Měření na MM je dle uvedených výsledků použitelné pouze pro velké otěry d a jen pro velké úhly α .

Kapitola 7

Měření otěru kyčelních implantátů pomocí 3D skenovací profilometrie

V předchozí kapitole 6.4 jsou uvedeny výsledky měření otěru uměle poškozených kyčelních implantátů a vyhodnocena metoda 3D optické skenovací profilometrie jako optimální měřicí metoda pro danou aplikaci. Cílem měření je kvantifikovat objemový úbytek hmoty tvořící kloubní jamku kyčelního implantátu. Měření je prováděno na implantátech odebraných z těla pacientů po určité době používání. Jedná se o velikosti otěru v řádech desítek až tisíců mm^3 . Měření bylo prováděno v průběhu několika let v závislosti na přísunu vzorků od pacientů. Experimentální sestava se měnila pouze nepatrně. Byly použity dva různé objektivy a v průběhu experimentu se jednou změnila použitá kamera, která se poté nahradila původní uvedenou v kapitole 5.6. Postupem času byly mechanické posuvy a rotace nahrazeny motorovými s elektronickým řízením (viz kapitola 5.6). Měřicí proces byl automatizován a došlo ke zrychlení měření a kalibrace. Před každou změnou měřicí sestavy byla provedena kalibrace a proměřeny referenční vzorky. Vzhledem k různým typům používaných jamek nebylo možné proměřit všechny tyto typy. U některých, vzhledem k jejich geometrii, nebylo prováděno měření vůbec. Docházelo k zastiňování měřeného profilu částmi těla jamky, nebo nebyly k dispozici referenční nepoužité jamky. Uvedené vzorky se budou proměřovat jinou alternativní metodou uvedenou např. v kapitole 6.4. Jedná se však pouze o zlomek z celkového počtu použitých poškozených jamek. V několika případech byly měřené vzorky v takovém stádiu destrukce, že nebylo možné provést po

měření rekonstrukci povrchu a výpočet úbytku. Bylo provedeno několik měření na nových nepoužitých vzorcích keramických kyčelních jamek. Cílem bylo ověřit použití metody na tomto typu materiálu. Jedná se o vysoce leštěnou keramiku s větší tvrdostí ve srovnání s polyethylenovou jamkou. Ukázalo se, že difuzní složka odraženého světla je dostatečná pro zaznamenání jednotlivých profilů. Pokud by byl povrch velice hladký, převažovala by spekulární složka odraženého světla (ta by se odrazila zpět k projektu v dané konfiguraci sestavy) a nebylo by možné registrovat na záznamovém zařízení měřený profil. Jelikož se jedná o novinku málo používanou v medicínské praxi, nejsou v současné době k dispozici použité jamky od pacientů s tímto materiálem. Proto nebylo prozatím provedeno žádné měření opotřebení keramické jamky.

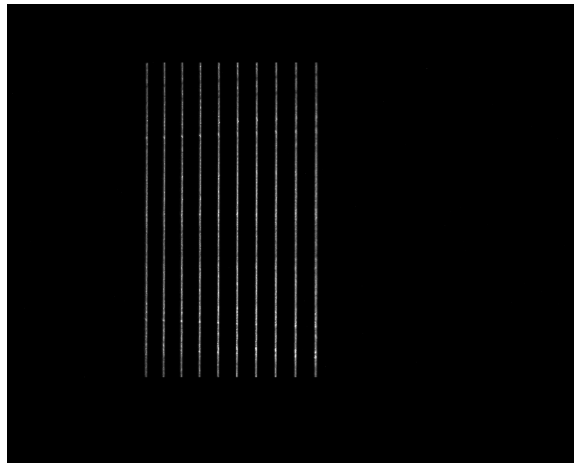
7.1 Kalibrace a justování experimentální sestavy

7.1.1 Justování experimentální sestavy

Nejprve je nutné najustovat experimentální sestavu. Osa projektoru musí být totožná s osou měřené jamky kyčelního implantátu. Následně je nutné nastavit správnou orientaci projektované struktury na měřený objekt (viz kapitola 5.5.2). To provedeme tak, že na držák měřeného předmětu umístíme referenční rovinu s dírkou a led diodou. Rotujeme svítící diodou o předem definovaný úhel, počítáme její pozici v těchto umístěních a poté vypočítáme těžiště vypočítaných pozic. Tím máme zdefinovanou osu měřeného předmětu. V dalším kroku promítneme na referenční rovinu světelnou stopu. Jelikož osa X, Y kamery je rovnoběžná s osou x měřeného objektu, musí být projektovaná struktura zobrazená na kameře také rovnoběžná s osou x záznamového zařízení. Rotujeme tedy s projektorem tak, až nastane tato podmínka. Tímto způsobem zajistíme správnou orientaci projektoru vůči měřenému předmětu. V posledním kroku zjistíme střed projektované struktury a porovnáme ho s osou měřeného objektu. Pokud nejsou totožné, posuneme projektor v ose y a tyto osy srovnáme. Program určený pro justování sestavy vytvořený v prostředí Matlab je uveden v Příloze A.5.

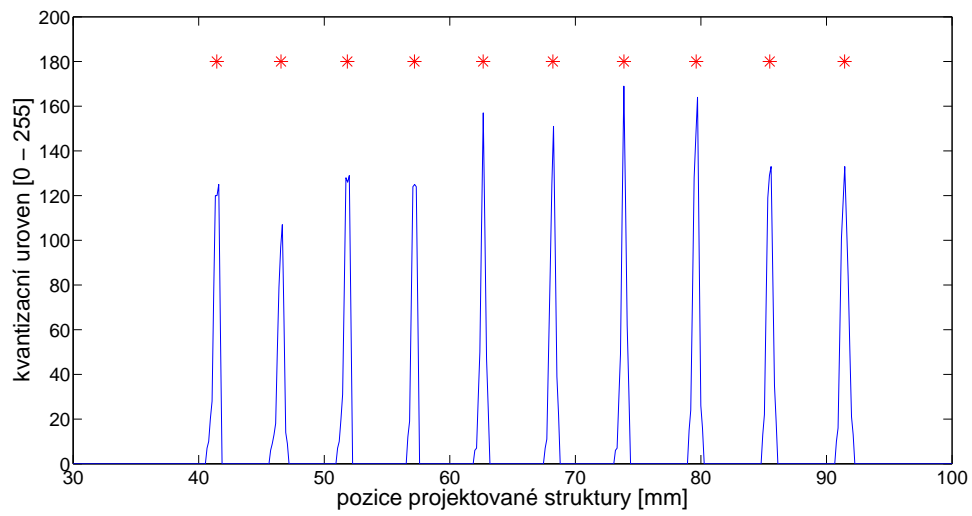
7.1.2 Kalibrace experimentální sestavy

Kalibraci pro osy x a y provedeme v souladu s popisem v kapitolách 5.2. Při kalibraci osy z postupujeme tak, že posunujeme kalibrační rovinu směrem od, nebo k záznamovému zařízení/projektoru. Rovinu posunuje po definovaných krocích. V každé poloze zaznamenáme pozici projektované struktury na kalibrační rovinu a vypočítáme její střed ve všech řádcích snímku pořízeného záznamovým zařízením. Poté spočítáme kalibrační konstanty pro jednotlivé pozice a řádky snímků. Při výpočtu konstant můžeme prokládat naměřené středy jednotlivých pozic polynomy. V praxi se nejčastěji volí polynom 1., nebo 2. řádu. Při výpočtu topografické polohy měřeného bodu na povrchu zkoumaného předmětu je touto volbou zabezpečena vysoká rychlost zpracování naměřených dat. Na obrázku 7.1 jsou patrné jednotlivé pozice kalibrační roviny. V tomto ilustračním případě byl zvolen krok translace ve směru osy $z = 5mm$. Na obrázku 7.2 jsou vykresleny středy projektované struktury ve vybraném řádku snímku. Křížky jsou vyznačeny vypočítané středy fitované polynomem 1. a 2. řádu (viz obrázek 7.3). Jak je patrné z obrázku 7.3, lépe průběh středů kalibračních rovin vystihuje polynom 2. řádu (viz obrázek 7.4). Křížky jsou vyznačeny

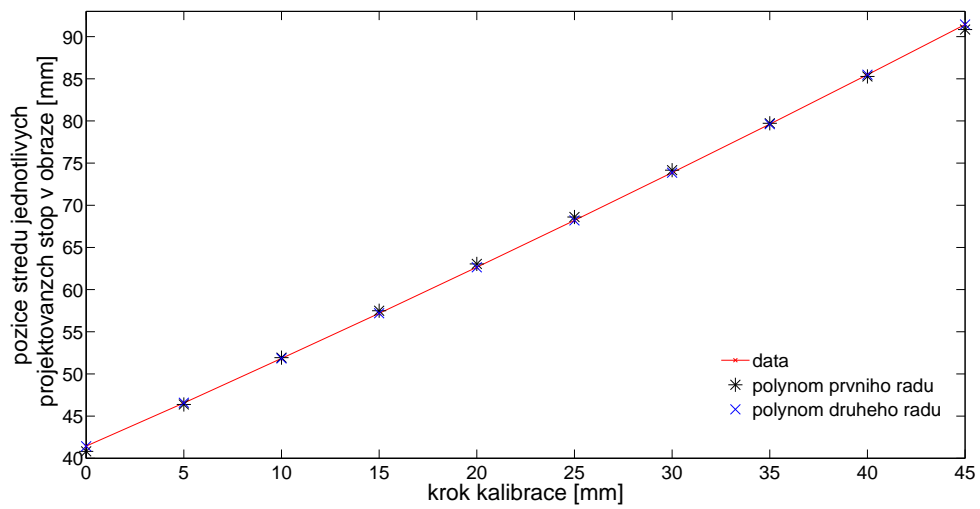


Obrázek 7.1: Kalibrační roviny s odstupem $5mm$.

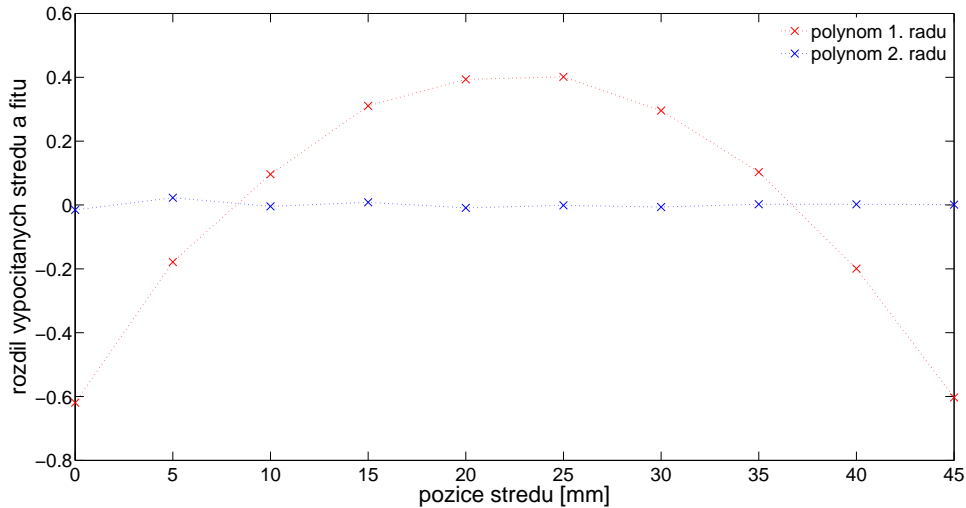
vypočítané středy fitované polynomem 1. a 2. řádu (viz obrázek 7.3). Jak je patrné z obrázku 7.3, lépe průběh středů kalibračních rovin vystihuje polynom 2. řádu (viz obrázek 7.4).



Obrázek 7.2: Vykreslení jednoho řádku s vypočítanými středy jednotlivých kalibračních rovin.



Obrázek 7.3: Červenou barvou jsou vykresleny vypočítané středy kalibračních rovin v jednom řádku, modře a zeleně pak fitovaná data polynomy 1. a 2. řádu.



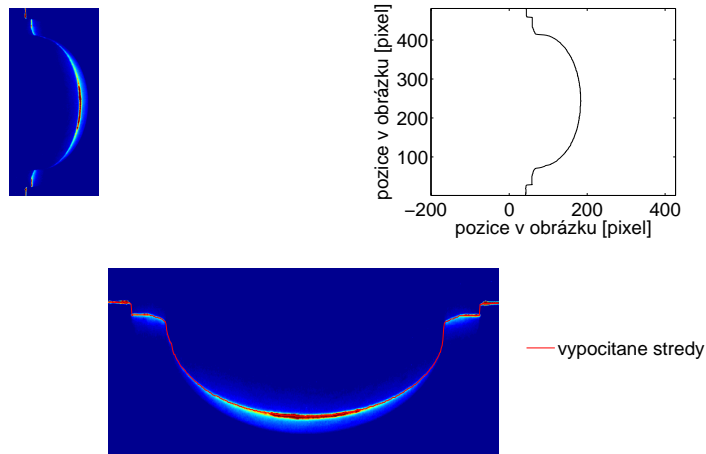
Obrázek 7.4: Graf rozdílů fitování polynomem 1. a 2. řádu.

7.1.3 Měření tvaru

Pokud máme provedenou kalibraci sestavy, můžeme přejít k samotnému měření topografie zkoumaného předmětu. Měřenou jamku vložíme do speciálního držáku. Ten je najustován dle popisu v podkapitole 7.1.1. Jeho tvar zajišťuje přesné nastavení měřené jamky v ose sestavy. S jamkou rotujeme kolem osy z s definovaným krokem rotace α . Digitální kamera experimentální sestavy uloží nasnímaný profil (viz obrázek 7.5). Poté se provede prahování a filtraci obrazu. Vypočítají se středy projektované struktury v jednotlivých řádcích. Pomocí kalibračních dat se spočítá topografická výchylka souřadnice v ose z jednotlivých středů. Pro souřadnice měřených bodů v rovině X, Y se využije převod z polárních souřadnic do kartézských. Známe totiž úhel natočení měřené jamky α a vzdálenost měřeného bodu od středu rotace (měřicí soustavy) r . Využijeme vztahu: $x = r \cos \alpha$, $y = r \sin \alpha$. Tímto dostaneme soubor N bodů lžicích na povrchu měřené jamky x_N, y_N, z_N . Jelikož se jedná o nepravidelnou síť bodů, zpravidla převádíme tento soubor na nový s pravidelnou sítí bodů v rovině X, Y . Potom výpočet objemu měřené jamky je dán jednoduchým vztahem:

$$V = \sum_{i=1}^N V_{\square}, \quad (7.1)$$

kde V_{\square} je objem základního měřeného elementu tvořeného nejbližšími sousedními měřeními body. Rozměry tohoto elementu jsou: $x_{\square} = x_i - x_{i+1}$, $y_{\square} = y_i - y_{i+1}$, $z_{\square} = z_i - z_{i+1}$. Objem tohoto elementu tedy vypočítáme jako: $V_{\square} = x_{\square} y_{\square} z_{\square}$. Pro výpočet nejistoty měření



Obrázek 7.5: Nejprve se nasnímá měřený profil (vlevo nahoře), provede se filtrace a výpočet středu v jednotlivých řádcích (vpravo nahoře). Obrázek dole ilustruje spojení dvou předchozích.

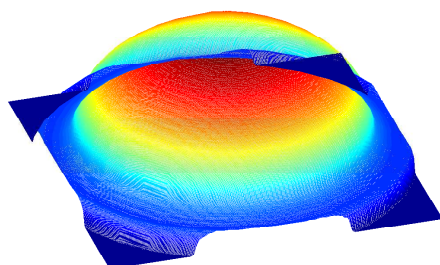
využijeme zákona šíření nejistot nepřímých měření. Provedeme parciální derivace vztahu (7.1) přes x, y, z . Výsledný vztah pro nejistotu měření objemu lze vyjádřit:

$$u_V = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{i\Box} y_{i\Box})^2 (u_{zi})^2 + (x_{i\Box} z_{i\Box})^2 (u_{yi})^2 + (y_{i\Box} z_{i\Box})^2 (u_{xi})^2}, \quad (7.2)$$

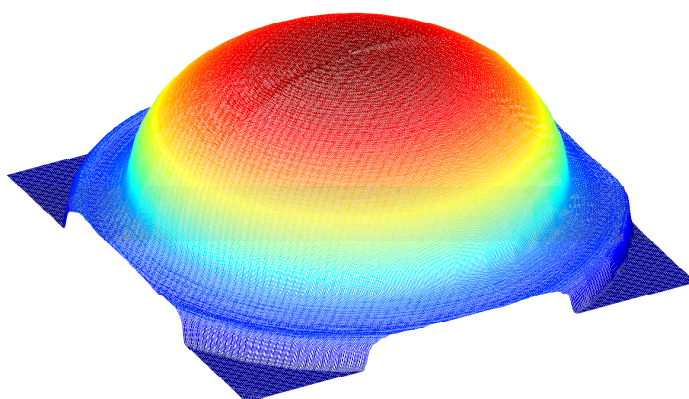
kde u_{xi}, u_{yi}, u_{zi} udávají chyby měření v jednotlivých osách. Tyto chyby se dají jednoduše odhadnout. Pokud budeme uvažovat chybu měření v osách $x, z \pm 1\text{pixel}$ (hodnota v ose y se počítá pomocí x), budou chyby při standardním nastavení měřicí sestavy: $u_{xi} = u_{zi} = 0,05\text{mm}$. Po dosazení do vztahu (7.2) vyjde chyba měření objemu řádově v jednotkách mm^3 .

Při měření použitých jamek porovnáváme měřené objemy s referenční hodnotou nové nepoužité jamky. Tento objem je dán souborem referenční jamek od výrobce. Na obrázcích 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 a 7.10 jsou vybrané naměřené jamky s některými typickými poškozeními. Na posledních dvou (obrázky 7.9, 7.10) je patrné poškození vnitřku jamky směrem k okraji.

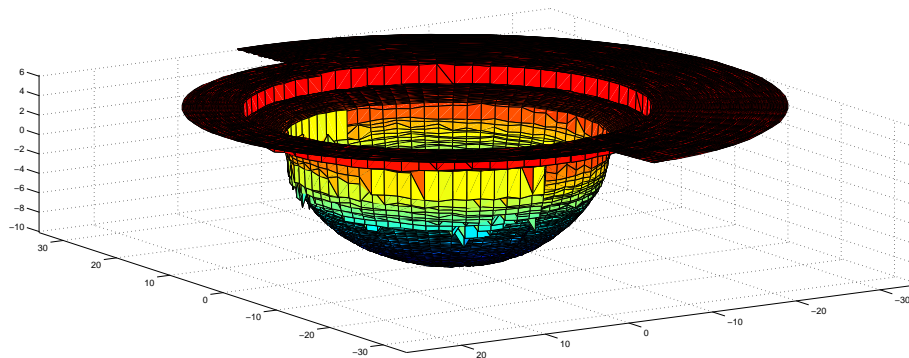
Vzhledem k velkému počtu naměřených poškozených implantátů a citlivých osobních dat obsažených v databázi není možné v této práci uvádět výsledky jednotlivých měření. Databáze je k dispozici pouze odborníkům z oboru.



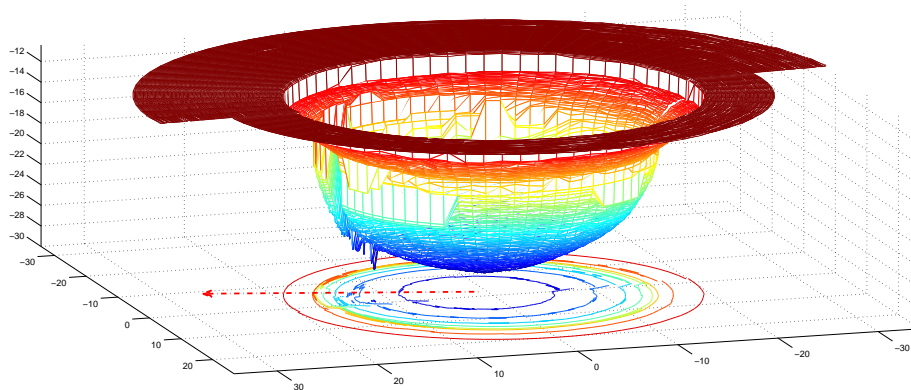
Obrázek 7.6: Naměřený tvar nepoškozené (referenční jamky).



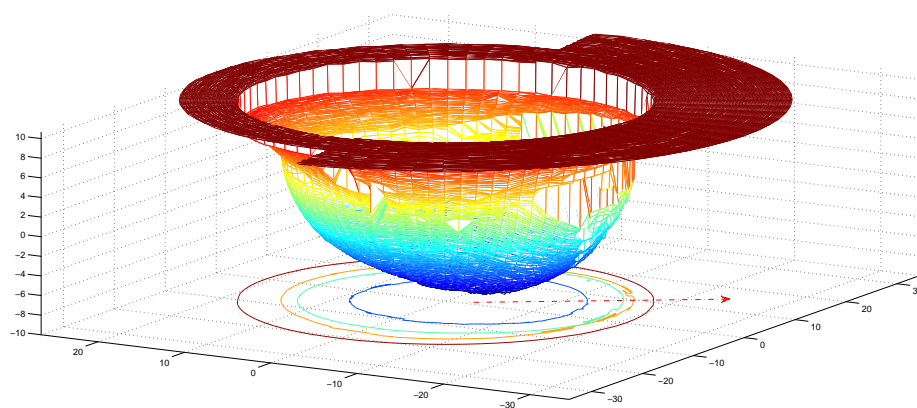
Obrázek 7.7: Jiný pohled na referenční jamku. Díky znalosti souřadnic v 3D prostoru je možné prohlédnout měřený objekt z jakéhokoli směru.



Obrázek 7.8: Příklad velice málo poškozené jamky. Objemový úbytek této jamky (ref. č. 242706) byl $358 \pm 7 \text{ mm}^3$).



Obrázek 7.9: Zástupce typického poškození. Z obrázku jamky (ref. č. 232614) je patrné opotřebení směrem k okraji jamky (naznačuje červená šipka).



Obrázek 7.10: Další vyobrazení poškozené jamky (ref. č. 232613, naměřené opotřebení má hodnotu $V = 1546 \pm 15mm^3$) (směr opotřebení naznačuje červená šipka).

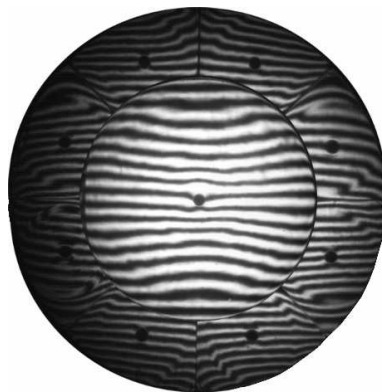
Kapitola 8

Další aplikace optických topografických metod

V kapitole 8 budou popsány některé experimenty související s optickou topografií, a které autor dizertační práce provedl během studia. Jedná se o testování tvaru povrchu odrazných sférických ploch pomocí Ronchi testu (kapitola 8.1) a dále testování vad povrchů výrobků určených pro automobilový průmysl (kapitola 8.3).

8.1 Teorie Ronchi testu

Digitální Ronchi test je modifikovaný Ronchi test, využívající moderních prostředků výpočetní techniky k zaznamenání a analýze měřených signálů. Při měření je možné využít metody posunu proužků (z anglického fringe Shifting) umožňující zvětšení rozlišovací schopnosti Ronchi testu. Metoda je zaměřená na zkoumání tvarů a odchylek povrchů dutých sférických zrcadlových segmentů určených pro fluorescenční teleskopy projektu observatoře PIERRE AUGER OBSERVATORY [56] v Malargüe (Mendoza, Argentina). Na obrázku 8.1 je příklad ronchigramu (výsledný obraz testu na kameře) LIDARu sestaveného z centrálního a osmi bočních sférických, konkávních segmentů s rozdílnými poloměry křivosti oproti středovému. Jedná se o sférická zrcadla. Podle tvaru jednotlivých proužků lze kvalitativně posoudit tvar povrchu odrazné plochy jednotlivých segmentů. Pro kvantitativní popis je nutné znát geometrické parametry měřicí sestavy. Výpočetní algoritmy tohoto experimentu jsou uvedeny v dalších podkapitolách.



Obrázek 8.1: Ronchi test LIDARu.

8.1.1 Ronchi Test

Již v roce 1923 V. Ronchi zjistil [57], že jestliže pozorujeme zrcadlo osvětlené z bodového zdroje přes mřížku umístěnou v okolí jeho středu křivosti, vytváří se na ploše zrcadla stínový obrazec, ze kterého lze usoudit jaké má zrcadlo vady. U Ronchi testu [58] se část paprsků jdoucích od konkávního zrcadla odstíní a tím se při pohledu na toto zrcadlo vytvoří

stínový obrazec. U tohoto testu pozorujeme odraznou plochu přes soustavu hran (mřížku). Pokud budeme teoreticky uvažovat ideální sférickou plochu, dostáváme stínový obrazec ve formě homogenně osvětleného či tmavého pole, a to v případě mřížky situované přesně v poloměru křivosti. Při mírné defokusaci bude výsledný obraz ve formě ekvidistantních pruhů [59].

Ronchi test byl prvotně vyvinut ke kvalitativnímu posouzení a korekci aberací při výrobě hvězdářských dalekohledů (sestavajících ze sférických ploch) [60]. S rozvojem výpočetní techniky a záznamových zařízení bylo možno vyhodnocovat výsledky testů a popsat je kvantitativně. Posuzuje se transmise odražené vlny přes mřížku tvořenou paralelními čárami, nejčastěji s obdélníkovým průběhem intenzity. Tradiční sestava je schopná vyhodnotit aberace ve dvou kolmých směrech v rovině Ronchi testu. Test je umístěn v blízkosti středu křivosti plochy testovaného objektu.

8.1.2 Matematický popis

Mřížka, přes kterou je pozorována testovaná plocha je popsána v rovině X, Y vztahem:

$$x_1 \cos \varphi - y_1 \sin \varphi = \frac{mT}{R}, \quad (8.1)$$

kde R je poloměr křivosti vlnoplochy, T mřížková konstanta a φ je uhel svírající mřížka a souřadné osy. Dále pro vlnoplochu platí:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{-x_1}{R}, \quad \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{-y_1}{R}. \quad (8.2)$$

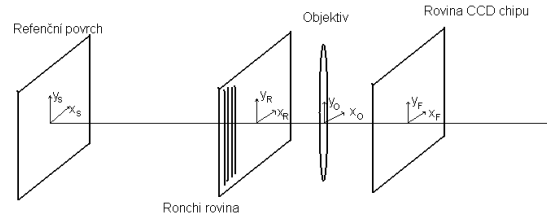
Po dosazení do předchozích vztahů dostaneme vyjádření pro m -tý proužek:

$$\frac{\partial W}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial W}{\partial y} \sin \varphi = -\frac{mT}{R^2}. \quad (8.3)$$

Při pozici mřížky mimo zdroj a ideální sférické ploše pozorujeme ekvidistantní proužky oddělené od sebe vzdáleností $S = \frac{RT}{l'}$, kde l' je vzdálenost mřížky od paraxiálního ohniska.

8.1.3 Difrakční teorie Ronchi testu

Ronchi test můžeme považovat také za (nizkofrekvenční) difrakční mřížku. Proto je nutné posoudit, jaký vliv bude mít difrakce na výsledný intenzitní obrazec. Systém budeme popisovat dle souřadnic na obrázku 8.2. Jak je z obrázku zřejmé, rovina referenčního



Obrázek 8.2: Souřadnicový systém Ronchi testu.

systému (plochy, kterou budeme testovat) je označena x_S, y_S [61], rovina s mřížkou (Ronchi rovina) x_R, y_R a rovina objektivu a CCD čipu kamery x_O, y_O , resp. x_f, y_f . Vzdálenost Ronchi roviny od roviny referenční je $r + \Delta r$, kde r je poloměr křivosti zkoumaného povrchu a Δr je vzdálenost mřížky od poloměru křivosti, d je vzdálenost objektivu od mřížky, f je ohnisková vzdálenost objektivu a T je perioda mřížky. Při výpočtech se předpokládá že pozice mřížky je mimo obrazovou rovinu („out of focus“). Pro výpočet komplexní amplitudy světla v rovině CCD čipu použijeme propagační integrál a Fresnelovu aproximaci. Komplexní amplituda v Ronchi rovině má tvar:

$$U'_R(x_R, y_R) = U_R(x_R, y_R) \cdot T(x_R, y_R). \quad (8.4)$$

Z Fourierovy teorie [62] platí pro rozložení komplexní amplitudy vlny v obrazové rovině čočky v souladu s obrázkem 8.2 vztah:

$$U(x_S, y_S) = \frac{e^{i \frac{k}{2f'} \left(1 - \frac{d}{f'}\right) (x_f^2 + y_f^2)}}{i \lambda f'} FT \left[U' \left(\frac{x_f}{\lambda f'}, \frac{y_f}{\lambda f'} \right) \right]. \quad (8.5)$$

Dosazením do rovnice (8.5) dostaneme tvar:

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{e^{i \frac{k}{2f'} \left(1 - \frac{d}{f'}\right) (x_f^2 + y_f^2)}}{i \lambda f'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx_R dy_R U'_R(x_R, y_R) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \left(x_R \frac{x_f}{f'} + y_R \frac{y_f}{f'}\right)}. \quad (8.6)$$

Dosažením do původní rovnice (8.4) a vyjádřením propustnosti mřížky pomocí Fourierovy série (jedná se o mřížku s obdelnikovým průběhem intenzity): $T(x_R, y_R) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n e^{i\frac{2\pi n}{T}x_R}$, dostáváme výraz pro amplitudu vlny vztah:

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{e^{i\frac{k}{2f'}\left(1-\frac{d}{f'}\right)(x_f^2+y_f^2)}}{i\lambda f'} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n u_f\left(\frac{1}{\lambda f'}\left(x_f - \frac{n\lambda f'}{T}\right), \frac{y_f}{\lambda f'}\right), \quad (8.7)$$

kde $u_f(x_f, y_f)$ znamená FT $U_r(x_f, y_f)$.

8.1.4 Příklad se sférickou vlnou

Předpokládejme, že ideální sférická vlna prochází Ronchi testem. Její rádius označme Δr a pro $U_R(x_R, y_R)$ platí:

$$U_R(x_R, y_R) = \frac{A}{\Delta r} e^{-i\frac{k}{2\pi\Delta r}(x_R, y_R)}. \quad (8.8)$$

Dosažením vztahu (8.8) do rovnice (refeq:vysledek) a použitím $R_O = \frac{f'^2}{\Delta r}$ dostáváme pro komplexní amplitudu v rovině CCD čipu výraz:

$$U_f(x_f, y_f) = -\frac{A}{f'} \cdot e^{i\frac{k}{2f'}\left(1-\frac{d}{f'}\right)(x_f^2+y_f^2)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n \cdot e^{i\frac{\pi}{\lambda R_O} \left[\left(x_f - \frac{n\lambda f'}{T}\right)^2 + y_f^2 \right]} \quad (8.9)$$

Výsledkem je tedy superpozice nekonečně sférických vln s poloměrem křivosti R_O , amplitudou B_n a středem v $x_f = \frac{n\lambda f'}{T}$. Detekovaná struktura na CCD prvku nebude ostrá, ale bude rozmazaná v důsledku superpozice velkého množství difrakčních řádů.

8.1.5 Paprsková teorie Ronchi testu

V tomto případě nebudeme brát v potaz difrakci světla na mřížce. Označme vlnoplochu funkcí $W(x_s, y_s)$. Pro normálové vektory vlnoplochy platí vztahy:

$$\vec{\nabla} \cdot W(x_s, y_s) = \left[\frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s}, \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}, \sqrt{1 - \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s} - \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}} \right] \quad (8.10)$$

V našem případě můžeme považovat z složku za jednotkovou, je to směr jakým se odráží paprsek od plochy. V každém bodě plochy lze tedy vypočítat paprskovou rovnici:

$$\frac{x - x_s}{\frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s}} = \frac{y - y_s}{\frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}} = z. \quad (8.11)$$

Rovnice 8.11 platí pro rovinu X_s, Y_s v $z = 0$, pro jakoukoli rovinu ve vzdálenosti $z \neq 0$, pak platí vztah:

$$x = x_s + z \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s}, y = y_s + z \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}. \quad (8.12)$$

V Ronchi rovině tedy tedy analogicky vyjádřit:

$$x_R = x_s + (r + \Delta r) \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s}, y_R = y_s + (r + \Delta r) \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}. \quad (8.13)$$

Pro malé úhly bude platit aproximace:

$$\frac{x_s}{r} = \frac{x_R}{\Delta r} = \frac{x_O}{d + \Delta r} = \frac{x_f}{f'} \quad (8.14)$$

$$\frac{y_s}{r} = \frac{y_R}{\Delta r} = \frac{y_O}{d + \Delta r} = \frac{y_f}{f'}. \quad (8.15)$$

Pro průnik paprsků s rovinou CCD čipu x_f, y_f platí:

$$x_f = \frac{f'}{\Delta r} x_R = \frac{f'}{\Delta r} x_s + f' \frac{(r + \Delta r)}{\Delta r} \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s} \quad (8.16)$$

$$y_f = \frac{f'}{\Delta r} y_R = \frac{f'}{\Delta r} y_s + f' \frac{(r + \Delta r)}{\Delta r} \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}. \quad (8.17)$$

Dále zadefinujeme mřížku Ronchi testu pomocí vztahů: $x_R = mT$ a $y_R = y_R$, přičemž stále předpokládáme případ znázorněný na předchozím obrázku 8.2. Při otočení mřížky o 90° by analogicky platilo: $x_R = x_R$ a $y_R = mT$. Dosazením do předchozích vztahů (8.16, 8.17) dostáváme výsledný tvar:

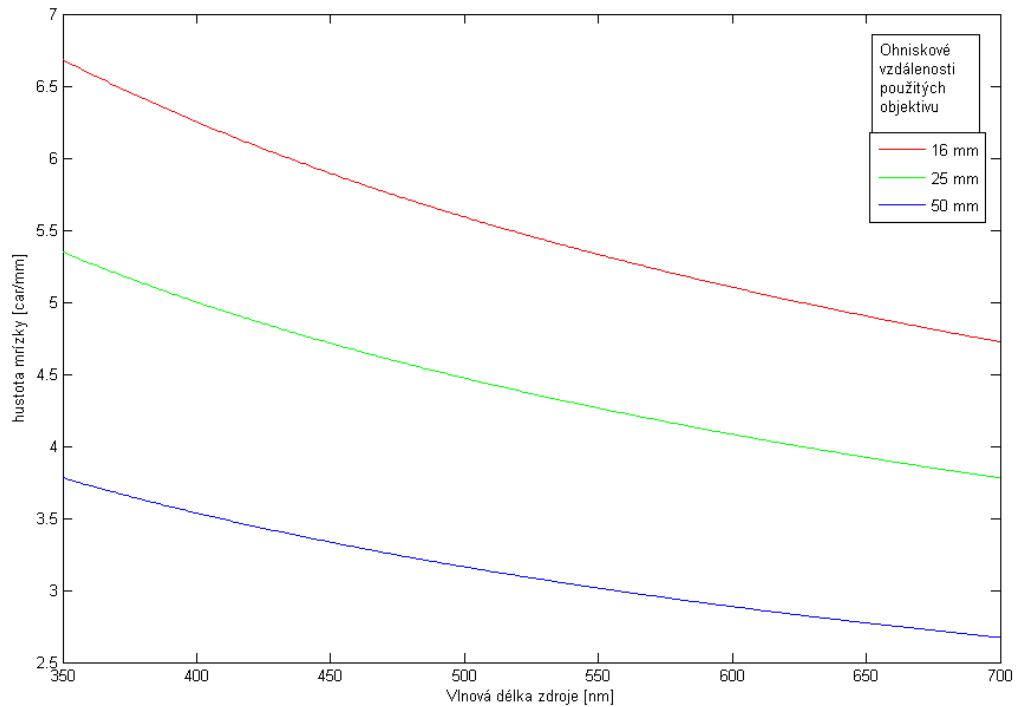
$$x_f = m \frac{f' r}{\Delta r^2} T + f' \frac{(r + \Delta r)}{\Delta r} \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial x_s} \quad (8.18)$$

$$y_f = m \frac{f' r}{\Delta r^2} T + f' \frac{(r + \Delta r)}{\Delta r} \frac{\partial W(x_s, y_s)}{\partial y_s}. \quad (8.19)$$

8.1.6 Porovnání difrakční a paprskové teorie

S přihlédnutím na rovnici (8.7) je nutné stanovit limit, kdy difrakční efekt nebude ovlivňovat výsledek měření. Musíme se omezit pouze na první difrakční řád. Tento případ nastane pokud bude perioda mřížky splňovat podmínku: $\frac{\lambda f'}{2T} < \frac{T}{8}$. Při experimentu využívajícího jako zdroje světla He-Ne laser s vlnovou délkou $\lambda = 635nm$ a objektivem s ohniskem $f' = 50mm$ odpovídá této podmínce mřížka s periodou $T > 0,356mm$. Pro

mřížku s menší periodou je nutné počítat s difrakčním efektem, který může výsledné měření ovlivnit. V grafu na obrázku 8.3 je vykreslena závislost hustoty mřížky na vlnové délce světla použitého zdroje. Výpočet je proveden pro tři různé ohniskové vzdálenosti objektivu: $f = 16\text{mm}$, $f = 25\text{mm}$ a $f = 50\text{mm}$.



Obrázek 8.3: Graf závislosti vlnové délky zdroje a hustoty testu na zvoleném ohnisku objektivu CCD kamery.

8.1.7 Měření povrchu optických prvků

V dalším textu se zaměříme na zpracování a vyhodnocení měření konkávních reflexních povrchů pomocí geometrické teorie Ronchi testu.

Vyhodnocení měření pomocí geometrické teorie

Lokální deformace měřeného povrchu se v tomto případě zjišťují nepřímo, pomocí výpočtu normálových vektorů měřených bodů povrchu předmětu. Při výpočtu je nutné znát některé geometrické parametry celého testu a těmi jsou:

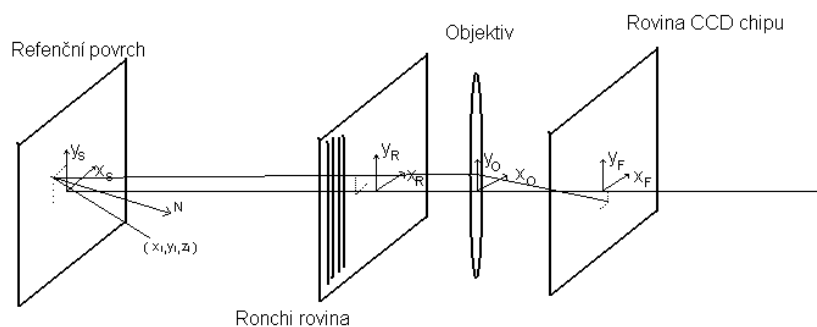
1. hustota mřížky [čar/mm],

2. pozice světelného zdroje od zkoumaného povrchu,
3. pozice testu od zkoumaného povrchu,
4. ohnisková vzdálenost objektivu.

Ze struktury načtené ze záznamového zařízení lze nejprve vypočítat souřadnice jednotlivých paprsků v rovině objektivu zaostřeného do nekonečna, v jehož obrazové rovině je umístěn snímací prvek. Můžeme tedy vypočítat směr šíření paprsku (předpokládáme malé úhly):

$$\bar{s}_R = \left(\frac{x_f}{f'}, \frac{y_f}{f'}, \sqrt{1 - \left(\frac{x_f}{f'}\right)^2 - \left(\frac{y_f}{f'}\right)^2} \right) \approx \left(\frac{x_f}{f'}, \frac{y_f}{f'}, 1 \right). \quad (8.20)$$

V dalším kroku zjistíme souřadnice průniku téhož paprsku s rovinou testu (souřadnice x_R, y_R , bude vysvětleno v následujícím textu), a poté můžeme spočítat výslednou paprskovou rovnici. Obrázek 8.4 popisuje situaci šíření paprsku od zkoumané plochy k záznamovému zařízení.



Obrázek 8.4: Šíření paprsku od povrchu k záznamovému zařízení, z obrázku je patrný normálový vektor k povrchu v měřeném bodě N .

Zdroj je umístěn mimo osu testu a jeho souřadnice jsou x_1, y_1, z_1 . Ostatní parametry jsou stejné jako v předcházejícím popisu. Paprskovou rovnici lze zapsat ve tvaru:

$$\frac{x - x_R}{\frac{x_f}{f'}} = \frac{y - y_R}{\frac{y_f}{f'}} = z - (r + \Delta r). \quad (8.21)$$

Dále předpokládejme, že je zkoumaný povrch rovinný $(x_S, y_S, 0)$, potom průnik paprsku s plochou můžeme vypočítat pomocí rovnic:

$$x_S = x_R - \frac{r + \Delta r}{f' x_f}, \quad (8.22)$$

$$y_S = y_R - \frac{r + \Delta r}{f' x_f}. \quad (8.23)$$

V případě, že zdroj je umístěn v bodě (x_1, y_1, z_1) a dopadový paprsek bude mít směr $s_1 = \left(\frac{x_1 - x_S}{z_1}, \frac{y_1 - y_S}{z_1}, 1 \right)$, můžeme vypočítat jednotlivé složky normálového vektoru v bodě povrchu takto:

$$N_x = \frac{1}{2} [s_{R_x} + s_{1_x}] = \frac{x_f}{2f'} \left[1 + \frac{r + \Delta r}{z_1} \right] + \frac{1}{2z_1} [x_1 - x_R] \quad (8.24)$$

$$N_y = \frac{1}{2} [s_{R_y} + s_{1_y}] = \frac{y_f}{2f'} \left[1 + \frac{r + \Delta r}{z_1} \right] + \frac{1}{2z_1} [y_1 - y_R]. \quad (8.25)$$

Tímto získáme soubor bodů na povrchu zkoumaného předmětu a složky jeho normálového vektoru. Pomocí těchto bodů a normálových vektorů můžeme zrekonstruovat celý povrch předmětu.

8.2 Digitální Ronchi test

V dalším textu je popsán princip vytváření ronchigramu, jednotlivé části sestavy a záznam signálů.

8.2.1 Ronchi mřížka

Při realizaci experimentu je velký důraz kladen na kvalitu testu (mřížky). Jeho přesná struktura a kvalita zpracování má významný vliv na výsledek měření. Nejčastěji se používají testy s obdélníkovým intenzitním průběhem. často se rovněž používají mřížky se sinusovým intenzitním průběhem. Jejich velkou výhodou je přesnější zpracování naměřených dat. Při použití algoritmů fitování křivek (z anglického „curve fitting“), lze velice přesně určit polohu maxima jednotlivých čar testu, a tím lokalizovat s velkou přesností měřený bod povrchu. Nevýhodou sinusových mřížek je pracná a nákladná výroba. Jelikož je daný limit hustoty mřížky (do 3 čar/mm - vzhledem k difrakci), je nutné zvolit velice hustý zápis na transparent. Platí, že s rostoucím hustotou testu roste rozlišovací schopnost metody. Proto je nasnadě používat testy s vysokou prostorovou frekvencí. To samozřejmě klade nároky na záznamové zařízení (kvalita objektivu a rozlišení senzoru). Vzhledem k difrakční podmínce je zvolená hustota mřížky 2 čáry/mm.

Nejprve se zjistí souřadnice x_R jednotlivých čar. Čáry testu jsou v tomto případě orientovány svisle. Poté se test otočí o 90° a zjistí se souřadnice y_R čar. Je nutné nastavit test tak, aby jedna z čar (nejlépe uprostřed testu) procházela osou celé optické sestavy. Test se tedy otáčí kolem této osy a zaznamenávají se ronchigramy ve dvou orientacích mřížky. Hodnoty průniku dvou kolmých mřížek x_R a y_R se použijí ve vzorcích (8.25) pro výpočet normál N_x, N_y . Test lze umístit na rotační stolek s kruhovým otvorem uvnitř. Jako další možnost se jeví použití prostorového modulátoru světla.

8.2.2 Experimentální sestava

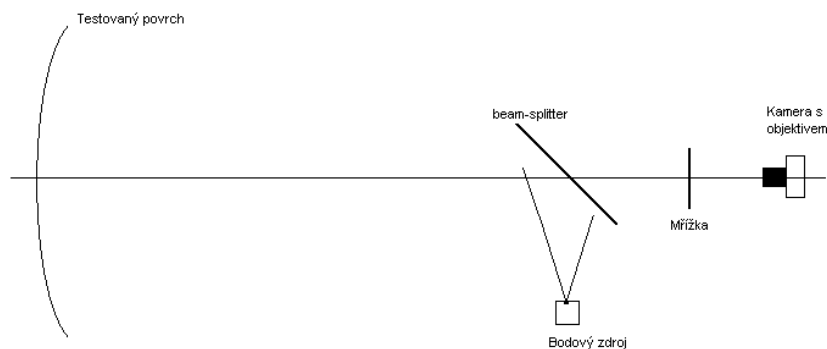
Experimentální sestavu lze rozdělit do tří částí:

1. světelný zdroj,
2. část se zkoumaným předmětem,

3. detekční část.

Zdroj světla

První část experimentální sestavy tvoří zdroj světla (laser, dioda, termální zdroj). Nejlepším zdrojem z hlediska detekce je He-Ne laser, nebo vysoce svítivá červená dioda. Kvantová účinnost CCD a CMOS snímačů na této vlnové délce je cca 75% u čelně osvětlovaných detektorů (z anglického „front illuminated“) a až 85% u detektorů osvětlených zezadu (z anglického „back side illuminated“). Za tímto zdrojem je umístěna dirková clona (pin-hole) s malým rozměrem (řádově stovky μm). Aby se docílilo osvitu měřeného povrchu, mřížky a kamery v ose, vložíme mezi zdroj a osu optické sestavy blánový dělič („pellicle beam-splitter“) s dělicím poměrem 50/50 pro vlnovou délku zdroje. Ten eliminuje posun světelných paprsků vůči ose sestavy (je velice tenký oproti dělicímu zrdátku). Světlo se odrazí od přední plochy směrem k měřenému povrchu. Od něj se odrazí zpět na světelný dělič, projde jím a dopadne na kameru. Schéma sestavy je demostrováno na obrázku 8.5. Bylo zvoleno toto experimentální uspořádání z důvodu jednoduššího výpočtu. Pokud použijeme takto navrženou sestavu, budeme mít zdroj a detektor v jedné ose (využitím děliče orientovaného vůči ose pod úhlem 45°). Pro výpočet je nutné zjistit pouze vzdálenost zdroje od testu z_1 . V případě umístění zdroje mimo osu, musíme změřit ostatní souřadnice v prostoru x_1, y_1 . Pro další výpočty budeme předpokládat umístění zdroje v ose.



Obrázek 8.5: Sestava Ronchi testu. Mřížka je na otočném motorizovaném stolku.

Testovaný povrch

Druhou částí experimentální sestavy představuje testovaný povrch. Je nutné, aby zkoumaný předmět byl uchycen na držák, kterým lze následně předmět posunovat a naklánět vůči ose z . Tento držák bude při měření sloužit k justování celé sestavy. Testovaným povrchem je šestiúhelníkové duté sférické zrcadlo určené pro fluorescenční teleskop projektu Pierre Auger Observatory a čtvercové zrcadlo pro projekt RICH.

Detekční část

Poslední částí experimentální sestavy je záznamové zařízení. Je tvořeno mřížkou a kamerou s objektivem. Při volbě objektivu je nutno brát zřetel na jeho ohniskovou vzdálenost. Jeho velikost ovlivní volbu periody mřížky testu. Objektiv je zaostřen na nekonečno. Dále je nutné brát ohled na volbu kamery. Z hlediska typu snímače je nejvhodnější CMOS snímač. Jednotlivé pixely jsou těsně vedle sebe (odpadá nutnost posuvných registrů jako u CCD snímačů) a jejich citlivost je větší a také jsou méně citlivé na termální šумы.

Při justování celé sestavy je nutné každou součást nastavit do osy sestavy a v případě mřížky a kamery zabezpečit kolmost jejich ploch k této ose. Osovost testu lze nastavit například tak, že použijeme sférickou odraznou plochu a mřížku umístíme do poloměru křivosti této plochy (využijeme již zmíněný zdroj s děličem světla). Poté nastavíme mřížku tak, aby světelný bod byl přesně v jejím středu a dotýkal se hrany středové čáry. Poté otočíme mřížku o 90° a nastavíme světelný zdroj opět na hranu čáry ve středu mřížky. Tím si zabezpečíme pozici testu přesně v ose sestavy. Podobně nastavíme kameru. Změříme vzdálenost Ronchi roviny od měřeného povrchu a vzdálenost objektivu od téže roviny. V tomto okamžiku je sestava připravena k měření. Načteme dva snímky s odlišnou orientací mřížky (vertikální a horizontální pozice čar). Při manipulaci s mřížkou je nutné dodržet parametr rotace kolem osy sestavy (90°). V našem experimentu použijeme prostorový amplitudový filtr, kterým nasimulujeme obdélníkovou mřížku ve dvou na sobě kolmých směrech.

8.2.3 Posun fáze Ronchi mřížky

Zvýšení rozlišení testu lze dosáhnout pomocí metody posunu fáze mřížky („Phase shifting“)[63]. Metoda spočívá v posouvání mřížky o definovanou vzdálenost. Je tedy možné vyhodnotit více bodů povrchu současně a tím přesněji popsat topografii zkoumaného předmětu. Snímky se načítají postupně pro jednu orientaci mřížky a pro různé pozice v jedné ose. Poté se otočí mřížka o 90° a proces se opakuje. Jednotlivé snímky se k sobě přiřadí a vyhodnocují se společně.

8.2.4 Vyhodnocení naměřených dat

V nejjednodušším případě dostaneme jako vstupní data pro obrazovou analýzu a následné vyhodnocení dva snímky se systémem křivek. V případě shiftingu zpracováváme soubor snímků, kde důležitým parametrem je posun mřížek od původní pozice (určení x_R, y_R). Nejprve je nutné snímky upravit pomocí algoritmů obrazové analýzy („image processing“) a poté vyhodnotit vstupy pro výpočtové algoritmy.

Obrazová analýza

V prvním kroku se snímek naprahuje. Tím se z naměřených dat odstraní šumy. V případě použití mřížky s obdélníkovým intenzitním průběhem se provede eroze snímku. Takto upravený snímek je připraven k dalšímu zpracování.

Zpracování dat

V tomto kroku se nahradí jednotlivé „široké“ křivky ronchigramů křivkami s jednotkovou tloušťkou. Jsou reprezentovány pouze body. Toto se provede pro obě orientace mřížky. V případě sinusového intenzitního profilu mřížky se použijí algoritmy „curve fitting“. Postupuje se v řádcích snímku kolmých na jednotlivé křivky. Data se fitují funkcí $\sin(I)$, kde I je intenzita v jednotlivých pixelech. Pomocí FFT (Fast Fourier Transformation) se zjistí spektrum v řádku, odfiltrují se parazitní frekvence a zpětně se rekonstruuje původní signál. Zjistí se průběh fáze a jednotlivá maxima. Dostaneme tak dvě matici bodů (pro mřížky ve dvou orientacích), které reprezentují středy křivek ve snímku. Dále vypočteme

průniky těchto matic. Výsledkem budou body, jejichž přesnou polohu v Ronchi rovině známe (spočítáme ji pomocí mřížkové konstanty) $x_r = m_x T, y_r = m_y T$. Vzdálenost těchto bodů na čipu kamery zjistíme ze znalosti velikosti pixelu. Směrové úhly paprsků v jednotlivých osách u, v spočítáme pomocí vztahů: $u = n_x \frac{\Delta x}{f'}, v = n_y \frac{\Delta y}{f'}$, kde n_x, n_y jsou pozice pixelu v rámci čipu (řádek a sloupec) a $\Delta x, \Delta y$ jsou velikosti jednotlivých buněk. Pro výpočet složek normálových vektorů v měřených bodech označme vzdálenost zdroje od povrchu zkoumané plochy d_S a vzdálenost mřížky od povrchu d_R . Platí vztahy:

$$x_S = x_R - \frac{d_R}{f'} x_f = m_x T - \frac{d_R}{f'} n_x \Delta x, \quad (8.26)$$

$$y_S = y_R - \frac{d_R}{f'} y_f = m_y T - \frac{d_R}{f'} n_y \Delta y. \quad (8.27)$$

a pro složky normálových vektorů platí:

$$N_x = \frac{n_x \Delta x}{2f'} \left[1 + \frac{d_R}{d_S} \right] - \frac{m_x T}{2d_S}, \quad (8.28)$$

$$N_y = \frac{n_y \Delta y}{2f'} \left[1 + \frac{d_R}{d_S} \right] - \frac{m_y T}{2d_S}. \quad (8.29)$$

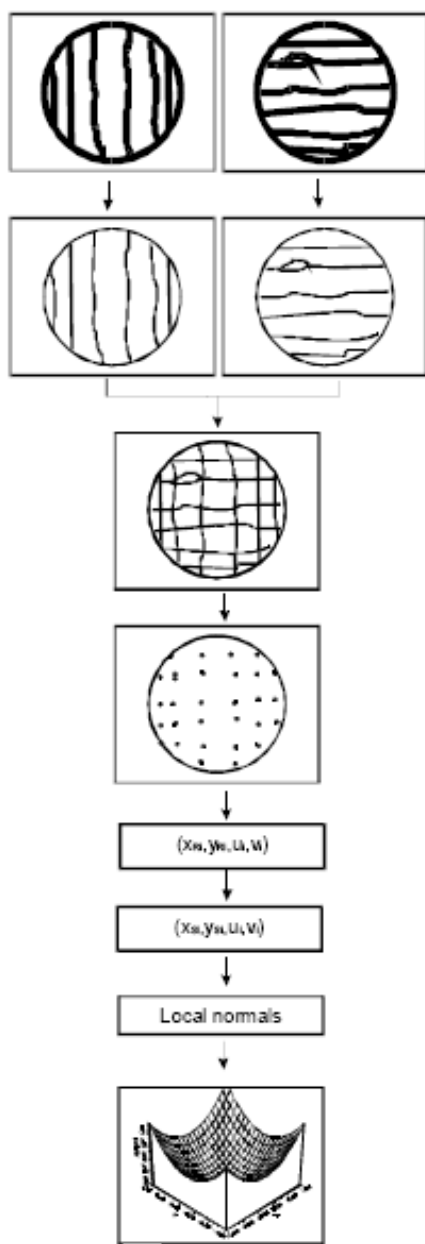
Můžeme tedy spočítat normály v bodech, kde se protínají oba ronchigramy a poté rekonstruovat povrch zkoumaného předmětu. Postup zpracování dat je patrný z obrázku 8.6.

8.2.5 Rekonstrukce povrchu

Při rekonstrukci povrchu měřeného předmětu použijte jednoduchou integraci přes výsledné normálové vektory v jednotlivých bodech [64]. Využijeme znalosti jednotlivých složek normálových vektorů a pozic měřených bodů na zkoumané ploše. Pomocí jednoduchých vztahů můžeme vypočítat z -tové souřadnice v měřených bodech. Rozdíl z -tových souřadnic dvou sousedních bodů Δh lze vypočítat pomocí vztahů:

$$\Delta h = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{u_1 - u_2}{2} \right) \Delta x_{1,2} \right) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{v_1 - v_2}{2} \right) \Delta y_{1,2} \right), \quad (8.30)$$

kde $\Delta x_{1,2}, \Delta y_{1,2}$ jsou rozdíly x -ových, resp y -ových souřadnic sousedních bodů a u_1, v_1, \dots jsou směrové úhly paprsků od těchto bodů. Dostaneme tedy soubor bodů se souřadnicemi x_S, y_S, z_S z nichž můžeme rekonstruovat měřenou plochu, popř. posoudit odchylku tvaru



Obrázek 8.6: Jednotlivé kroky analýzy naměřených dat. Zjištění středů křivek, jejich průnik, separace měřených bodů, výpočet složek normál a směrových úhlů paprsků a posledním krokem je rekonstrukce plochy (převzato z [64]).

plochy od ideální situace. Lokální rádiusy popř. křivosti povrchu v bodě i lze spočítat pomocí vztahu:

$$N_x^i = \frac{x_s^i}{R_x^i} = C_x^i x_s^i, N_y^i = \frac{y_s^i}{R_y^i} = C_y^i y_s^i. \quad (8.31)$$

8.2.6 Chyby měření

Pokud budeme chtít srovnat chyby měření pro umístění zdroje v ose a mimo osu z (vychýlíme zdroj pouze v ose x), budeme vycházet ze vztahů:

$$N_x = \frac{n_x \Delta x}{2f'} \left[1 + \frac{d_R}{d_S} \right] - \frac{m_x T}{2d_S}, \quad (8.32)$$

pro osovou pozici zdroje a pro mimoosovou pozici:

$$N_x = \frac{n_x \Delta x}{2f'} \left[1 + \frac{d_R}{d_S} \right] + \frac{x_1}{2d_s} - \frac{m_x T}{2d_S}, \quad (8.33)$$

pro zdroj $x_1, 0, z_1$. Jestliže provedeme parciální derivaci obou rovnic a porovnáme je, dostaneme rozdíl v předposledním členu rovnice (8.33) pro mimoosové umístění zdroje. Tento člen nám vnese přídatnou chybu do měření. V případě použití zdroje v ose a započítání chyby dané nepřesným zpracováním plochy děliče, se situace bude podobat modelu testu s umístěným zdrojem mimo osu. Vzhledem ke katalogovým údajům rovinnosti ($\frac{\lambda}{10}, \lambda = 635nm$), se zdroj posune vzhledem k ose x . Chyby vypočítáme podobně jako v předchozím případě. Jelikož se jedná o velice přesnou plochu děliče a úhel dopadu paprsků od světelného zdroje na tuto plochu, je v intervalu $\langle 35^\circ \div 55^\circ \rangle$. Pak pro výpočet posunutí zdroje využijeme vztahu:

$$\Delta_{sv} = \frac{(\sin 2\alpha) \frac{\lambda}{10}}{\sin \alpha}, \quad (8.34)$$

kde Δ_{sv} je posun zdroje od osy x , α je dopadový úhel na plochu děliče a $\frac{\lambda}{10}$ popisuje kvalitu plochy z hlediska rovinnosti. Maximální posun zdroje od osy bude přibližně $1 \cdot 10^{-7} mm$. Pokud toto číslo dosadíme do vztahu pro výpočet normály N_x , popř. N_y , dostaneme tak malé číslo, že tento člen můžeme zanedbat. V případě posunu od zdroje řádově o mm od osy testu již musíme počítat s členem $\frac{x_1}{2z_1}$ popř. $\frac{y_1}{2z_1}$ při výpočtu normál.

Omezíme se na výpočet chyb měření lokálních rádiusů. Už z principu metody předpokládáme symetrii chyb při výpočtu C_x a C_y . Vyjdeme ze vztahu:

$$x_s = m_x T - \frac{\Delta x}{f'} n_x d_R. \quad (8.35)$$

S využitím rovnice (8.24) a kombinací s předchozí rovnicí (8.32) dostaneme pro vyjádření C_x výraz:

$$C_x = \frac{1}{2d_s} + \frac{1}{2d_R} \left[1 - \frac{1}{1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R} \right]. \quad (8.36)$$

Parciální derivací přes všechny vstupní proměnné dostaneme výraz pro výpočet chyby určení lokálních rádiusů:

$$\begin{aligned} \Delta C_x = & \frac{1}{2d_s^2} \Delta d_s + \frac{\frac{\frac{\Delta x}{f'}}{2m_x T}}{\left[1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R \right]^2} \Delta n_x + \frac{\frac{n_x}{2m_x T}}{\left[1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R \right]^2} \Delta \left(\frac{\Delta x}{f'} \right) + \\ & \frac{\frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{2m_x T}}{\left[1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R \right]^2} \Delta T + \left\{ \frac{1}{2d_s^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R} \right] + \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{2d_R m_x T} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{n_x \frac{\Delta x}{f'}}{m_x T} d_R \right]^2} \right\} \Delta d_R \end{aligned} \quad (8.37)$$

Pro výpočet lokálních rádiusů a jejich chyb platí $R_x = \frac{1}{C_x}$ a $\Delta R_x = \frac{1}{\Delta C_x}$. Stejně vztahy platí pro R_y a C_y . Pro rádius celé plochy (dané ze souboru naměřených bodů) se použije Studentovo rozdělení a hodnoty průměrných rádiusů, resp. křivostí plochy:

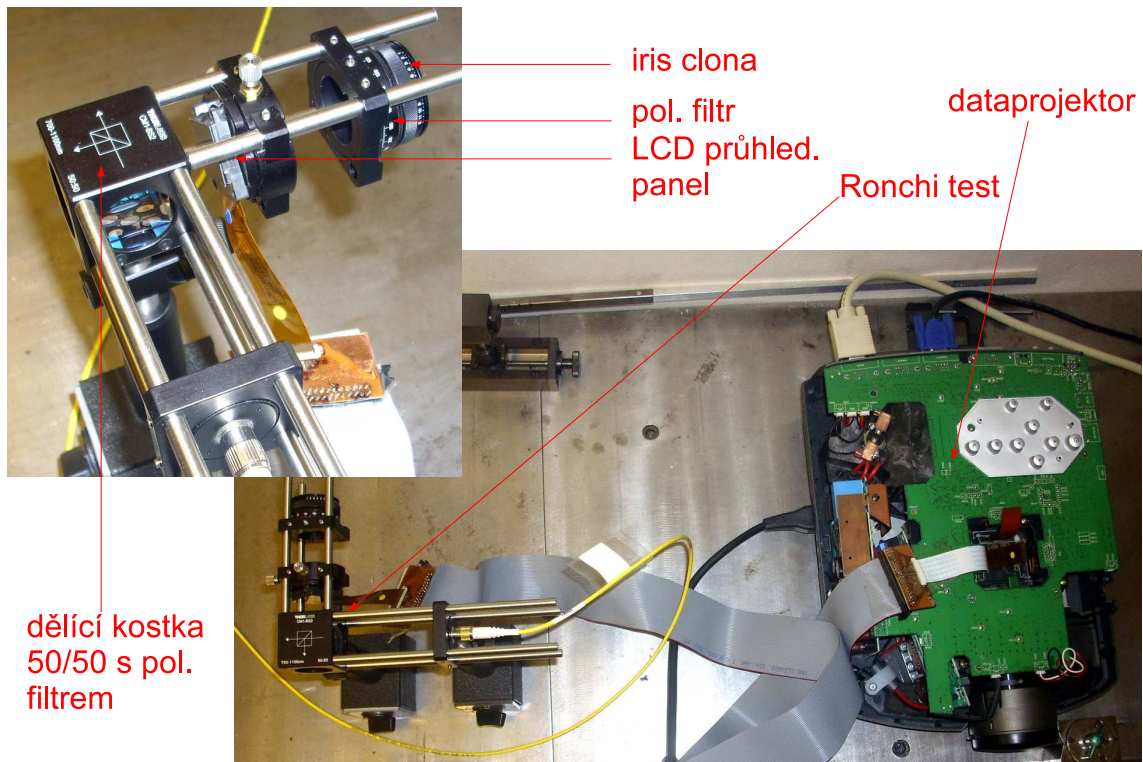
$$\Delta C_x = \frac{t_p [N - 2]}{\sqrt{N - 2}} \sqrt{\frac{\sum [N_x^i - \bar{N}_x]^2 - \frac{[\sum x_s^i N_s^i - N \bar{x}_s \bar{N}_s]^2}{\sum [x_s^i - \bar{x}_s]^2}}{\sum [x_s^i - \bar{x}_s]^2}}, \quad (8.38)$$

kde $t_p [N - 2]$ je hodnota Studentova rozdělení. Sumaci provádíme přes celý soubor naměřených bodů. Výsledek se tedy reprezentuje ve tvaru: $C_x \pm \Delta C_x$. Do tohoto výpočtu nezahrnujeme chyby zobrazení objektivu, jelikož jejich výpočet je velice náročný a komplikovaný.

8.2.7 Výsledky měření na zrcadlových segmentech

Jestliže splníme všechny podmínky testu (osovost prvků, difrakční limit, atd.), dosáhneme dle výpočtů chyb měření přesnosti do 2%. Při použití kamer a amplitudového prostorového modulátoru světla s vysokým rozlišením lze dále pracovat s citlivostí (zvyšovat citlivost celé metody) a dosáhnout lepší přesnosti. Nejvýhodnější se jeví sestava využívající zdroj

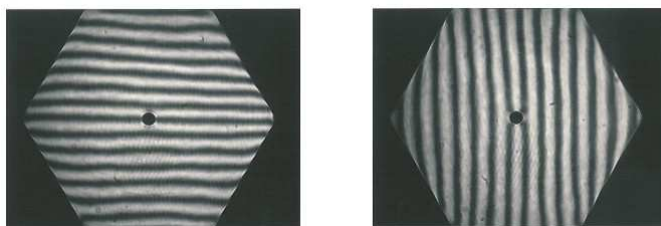
s děličem. Odpadne nutnost měření mimoosové polohy světelného zdroje a tím i zanešení další chyby do měření. Další možností je využití phase shifting, čímž dosáhneme většího rozlišení a povrch zrcadla se zmapuje přesněji [65]. Při reálných experimentech bylo využito poprvé amplitudového prostorového modulátoru světla ke tvorbě ronchi mřížky (viz obrázek 8.7). To umožňuje měření tvaru konkávních sférických odrazných ploch s přesností v μm v reálném čase a s rozlišením v osách kolmých na měřenou osu v řádech desetin mm . Ve společné laboratoři optiky je metoda využívána ke korekci vybraných obráběných optických ploch během výroby. Ze znalosti tvaru plochy je možné provést korekci nástroje popř. leštícího stroje a opravit obráběnou plochu. Slouží též ke kontrole tvaru vybraných kusů výrobků.



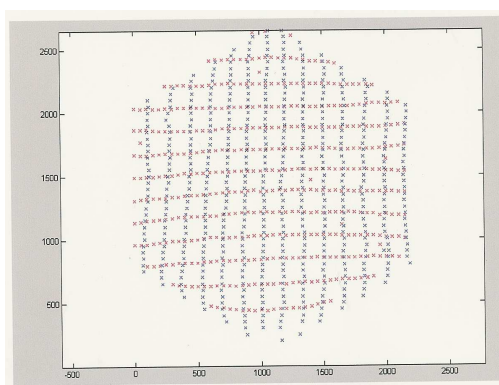
Obrázek 8.7: Sestava digitálního Ronchi testu. Světelným zdrojem je led dioda přivedená vláknem. Amplitudový modulátor je tvořen LCD průhledovým panelem s dvěma skříženými polarizátory (jsou potřebné jelikož LCD panel je fázový modulátor) a je řízen elektronikou v dataprojektoru. Dále je sestava tvořena iris clonou pro filtrování difrakčních řádů vzniklých na struktuře LCD panelu. Děličí kostka propuští světlo od zdroje po odrazu od měřeného povrchu světlo propustí na detektor umístěný za iris clonou.

Výsledky uváděných měření byly provedeny na zrcadlech určené pro projekt Pierre

Auger Observatory a zrcadlech určených pro teleskop RICH. Parametry zrcadla pro projekt Pierre Auger Observatory jsou: Typ II - 1604, poloměr křivosti $R = 3412mm$. Na obrázcích 8.8 - 8.10 je zobrazen princip analýzy digitálního ronchigramu. Nejprve se nasnímají [66] ronchigramy pro dvě orientace mřížky (obrázek 8.8), poté se vyseparují jednotlivé křivky a určí se jejich parametry. Následuje výpočet průniku jednotlivých křivek a výpočet normál v těchto bodech (obrázek 8.9). Posledním krokem je rekonstrukce povrchu testovaného zrcadla 8.10 ze znalostí parametrů sestavy a velikostí jednotlivých normálových složek.

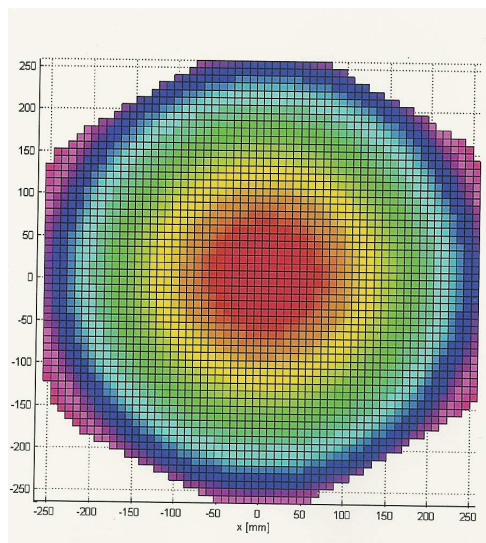


Obrázek 8.8: Ronchigramy plochy pro dvě orientace mřížek.



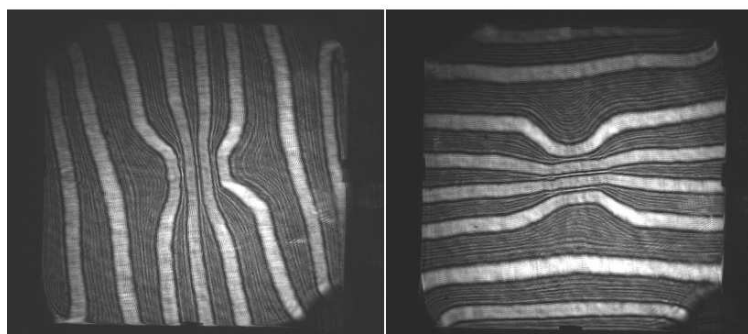
Obrázek 8.9: Po analýze jednotlivých ronchigramů a výpočtu jednotlivých křivek se tyto výsledky spojí a vypočítají se průniky křivek.

Další měření proběhlo např. na čtvercových ultratenkých (tloušťka těchto segmentů je cca 5 mm) zrcadlových segmentech určených pro detektor RICH (Ring Imaging Cherenkov detector). Jedna se o sférická zrcadla s poloměrem křivosti $3040mm$ a rozměrem $400 \times 400mm$. Na obrázcích 8.11, 8.12, 8.13, 8.14 jsou ronchigramy, průniky jednotlivých mřížek, rozdíly měřených bodů od nominální sférické plochy a rekonstruovaný povrch zrcadla.

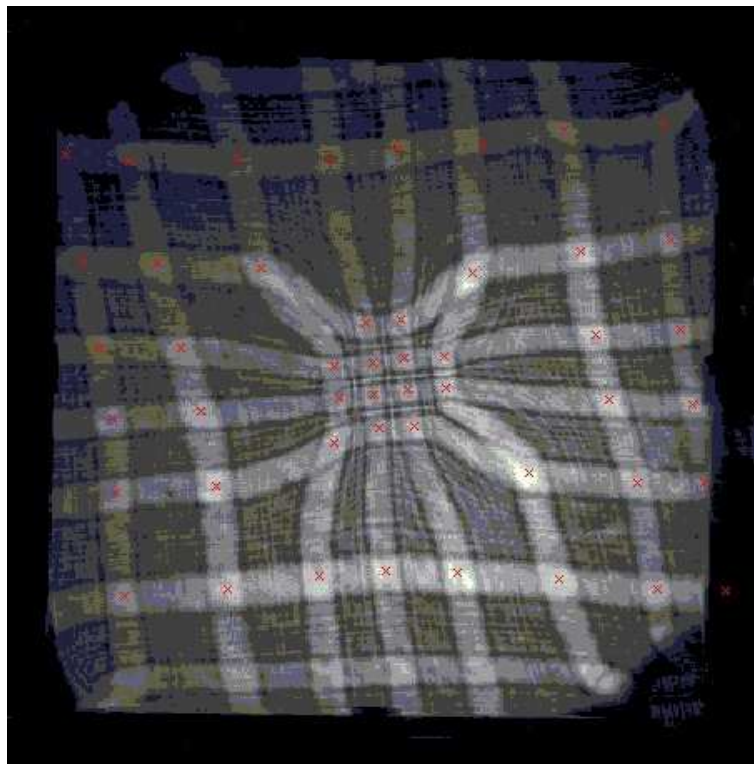


Obrázek 8.10: Rekonstruovaný povrch zrcadla II/1604.

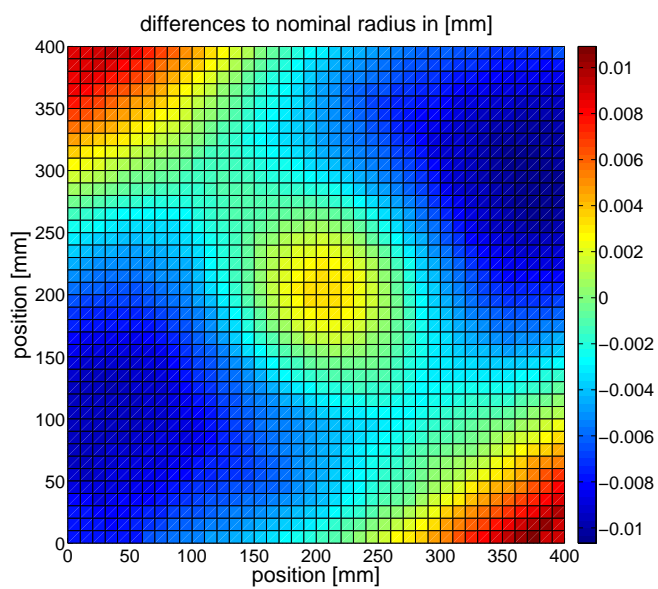
Měření bylo provedeno na jednom ze segmentů vyrobených ve Společné laboratoři optiky. Jedná se o zrcadlo s označením 11 s poloměrem křivosti $R = 3042\text{mm}$. Program pro vyhodnocení měření vytvořený v programu matlab je uveden v Příloze A.6



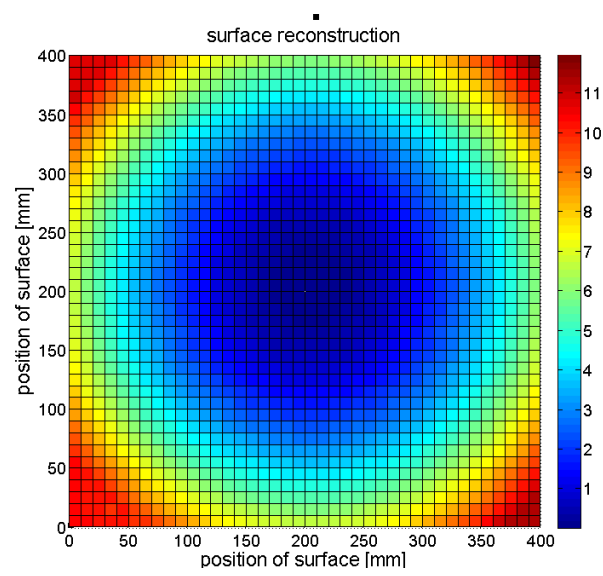
Obrázek 8.11: Ronchigramy sférického zrcadla pro různé navzájem kolmé orientace mřížek. Z obrázku je patrná deformace plochy ve středu plochy.



Obrázek 8.12: Ronchigramy sférického zrcadla pro různé navzájem kolmé orientace mřížek. Na obrázku je červenými křížky naznačen průnik obou struktur.



Obrázek 8.13: Rozdíl rekonstruované plochy zrcadla pomocí Ronchi testu srovnané s ideální sférou.



Obrázek 8.14: Plocha zrcadla vypočítaná pomocí Ronchi testu.

8.3 Analýza vad povrchů dílů určených pro automobilový průmysl

V této kapitole je popsána metodika kontroly ke zkoumání defektů plastových výlisků (nárazníků, lišt a součástí palubních desek) pomocí optických metod. Jedná se o vrypy, hrboly, hrany a nečistoty na povrchu plastových výlisků. Dále jsou vyšetřovány poruchy, které vznikají při lakování těchto dílů (zalakované kapky vody a nečistoty). Plastové výlisky určené pro interiéry a exteriéry automobilů lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou plasty nelakované, které se nejčastěji používají v interiérech a druhou jsou plasty opatřené barevným lakem totožným s barvou karoserie. Studie byla objednaná firmou Eola s.r.o. Olomouc a implementována do výroby pro jejich zákazníka.

8.3.1 Nejčastější defekty na povrchu výlisků

Interiérové (nelakované) díly nejčastěji znehodnotí mechanické poškození vnější plochy. Jedná se o škrábance, vpichy, hrboly nebo prohloubeniny na povrchu plastu [67]. U druhého typu plastových výlisků se setkáváme jednak se zalakovanými defekty typickými pro první typ plastů (nelakované plasty), nebo se zalakovanými nečistotami (kapky vody, prachové částice, vlas, vlákno), popř. zalakované velké znečištěné plochy (mastné oka apod.). Posledně jmenované poruchy jsou označovány jako „pomeračková kůže“. Posledním typem vad jsou zalakované nedoleštěné plochy. Tyto vady při různých pozorovacích podmínkách (intenzita osvětlení, zdroje osvětlení, odlišné směry pozorování) vytváří odlišný zrakový vjem pozorovatele. Při kontrole výlisků je nutné zvolit objektivní testovací metodu.

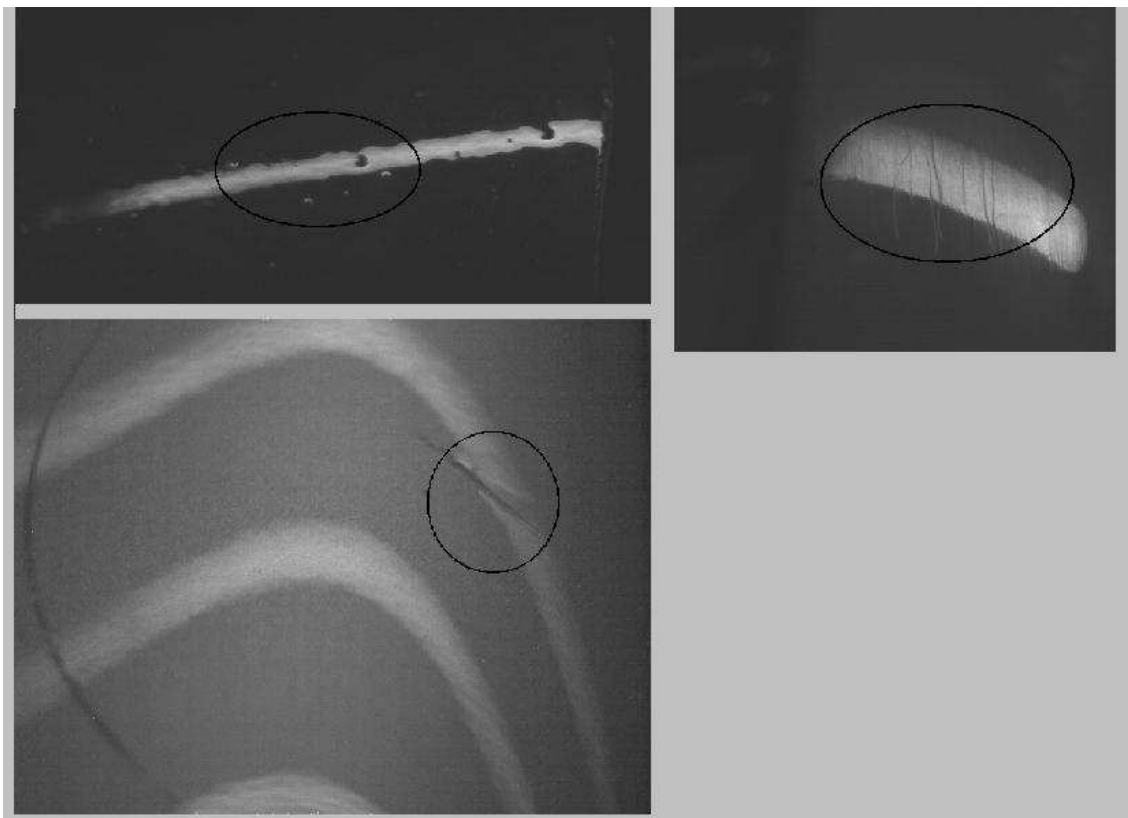
8.3.2 Měřicí metoda

Jako nejvýhodnější a nejrychlejší metodou se jeví optické bezkontaktní metody. Vzhledem k velikosti zkoumaných výlisků (od malých krytek velikosti řádově *mm*, až po velké části karoserie a interiéru) a komplikovaných tvarům jsme zvolili jednoduchou optickou sestavu tvořenou světelným zdrojem a záznamovým zařízením. Nejedná se v tomto případě o kvantitativní měření. Nezájímáme se o měření odchylek od zadaného tvaru. K tomuto typu měření lze použít např. 3D skenovací profilometrii, nebo Fourierovskou topografii.

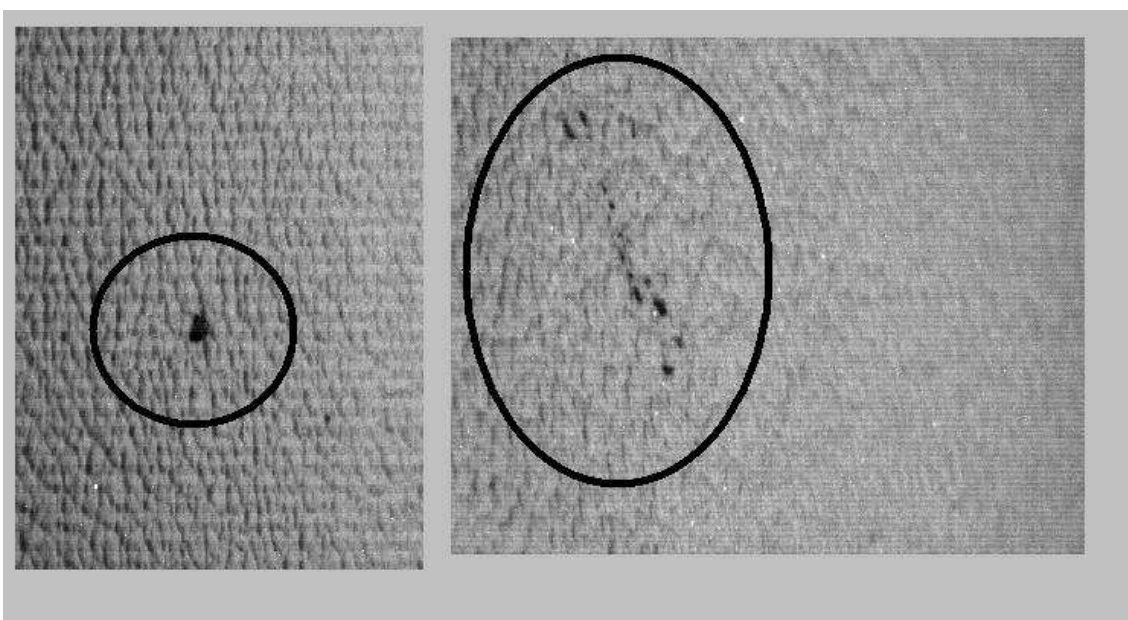
Na zkoumaný povrch se promítá určitá struktura, která se buď odrazí od povrchu, nebo se přímo pozoruje. Daný typ poškození se projeví tvarovou deformací projektované struktury. Obrázky se zpracovávají algoritmy image processingu. Provádí se prahování snímků, detekují se hrany a nespojitosti ve snímcích. Pro různé typy poruch se použije jiný algoritmus vyhodnocení. Nenáročnost sestavy umožňuje poměrně jednoduchou manipulaci s měřicím systémem a tím dovoluje diagnostikovat větší a tvarově komplikované předměty. Zjednodušeně řečeno se objekt celý oskenuje a nasnímané obrázky se vyhodnotí. Výhodou této testovací metody je počáteční znalost druhu poruchy vzhledem k použitému typu materiálu a povrchové úpravě. Můžeme proto navrhnout pro daný typ výrobku testovací postup a sestavu, která odhalí defekty na povrchu.

8.3.3 Výsledky testování

Na obrázcích 8.15 a 8.16 jsou snímky některých druhů poškození plastových výlisků lakovaných i nelakovaných. Poškození je patrné na všech obrázcích a je v nich popsáno vyhodnocení. První případ (obrázek 8.15 je projekce struktury na povrch měřeného předmětu. V dalším případě 8.16 se osvětluje povrch celý a vyhodnocuje se obraz povrchu.



Obrázek 8.15: Zalakované škrábance, kapky a praskliny. V obraze se analyzuje změna kontrastu v profilu projektované stopy. Defekty se projeví změnou intenzity.



Obrázek 8.16: Vady na nelakovaných površích. Osvětluje se povrch celého předmětu pod velkým úhlem a kontrolují se vady v závislosti na změně kontrastu v poškozeném místě.

Kapitola 9

Závěr

V práci byly popsány principy kontaktní topografické metody a řady optických topografických metod. Velká pozornost přitom byla věnována 3D skenovací profilometrii, aplikované na konkrétním měření. Dizertační práce rozebírá tuto metodu z několika vyhodnocovacích přístupů. V disertační práci je popsáno měření objemového úbytku kyčelních implantátů s využitím právě 3D skenovací profilometrie. Byly popsány některé metody měření objemového úbytku hmoty kloubních implantátů využívaných v klinické praxi. Měření na reálných náhradách kyčelního kloubu byla nejprve prováděna kontaktním měřicím mikroskopem (KMM), přičemž bylo provedeno srovnání optických bezkontaktních metod (3D skenovací profilometrie a Fourierovská topografie) s kontaktní měřicí metodou (KMM), metodou výpočetní (simulace v programovém prostředí Matlab) a gravimetrií. V konfrontaci s ostatními metodami byla právě 3D skenovací profilometrie vybrána jako nejoptimálnější pro daný typ měření.

Byla navržena a realizována měřicí sestava využívající 3D skenovací profilometrie pro stanovení objemového úbytku kyčelních náhrad. Navržená experimentální sestava byla dále využita při měření velkého počtu použitých kyčelních náhrad. V práci jsou rovněž uvedeny další dvě optické topografické metody realizované v průběhu studia autora dizertační práce. Jedná se o digitální Ronchi test a metodologii kontroly kvality plastových výlisků pro automobilový průmysl.

Za vlastní přínos této práce považuji podrobné zmapování 3D skenovací profilometrie, původní návrh experimentální sestavy a její praktickou realizaci měření velkého počtu

opotrebovaných kyčelních náhrad. V této oblasti výzkumu byla vůbec poprvé použita optická topografická měřicí metoda. Výsledky měření objemových úbytků jsou velice důležité pro studie dané problematiky. Dalším významným přínosem práce je modifikace digitálního Ronchi testu použitím říditelného prostorového modulátoru světla, který vnáší do této měřicí metody zvýšení rozlišení a může tak být podrobněji prozkoumán tvar měřené optické plochy. Měřicí sestava je konkrétně využívána pro měření tvaru sférických zrcadel v průběhu jejich výroby na pracovišti SLO UP a FZU AV ČR a je důležitým prvkem ve výrobním řetězci. Všechny v práci prezentované výsledky a metody jsou použité v praxi, podobně jako topografická metoda zabývající se defektoskopií plastových výlisků pro automobilový průmysl. Nové poznatky a výsledky měření byly publikovány a opakovaně přijaty vědeckou komunitou.

V budoucnu se předpokládá pokračování spolupráce s odborníky Ortopedické kliniky Fakultní nemocnice Olomouc na téma měření úbytku kloubních náhrad. V oblasti optických bezkontaktních metod je plánována realizace aplikace 3D skenovací profilometrie v průmyslové praxi. S potěšením lze konstatovat, že Ronchi test je již nyní nedílnou součástí výrobního procesu optických prvků na pracovišti Společné laboratoře optiky UP Olomouc a FZU AV ČR.

Summary

The thesis describes principles of contact methods and a range of optical topographical methods. The 3D scanning profilometry was introduced in detail and it was applied to specific measurements. The work discusses several approaches of the method evaluation. The thesis describes the measurement of volumetric loss of hip implants using 3D scanning profilometry. It reports some methods of measuring volumetric mass loss of joint implant utilized in clinical practice. Measurement of the real hip joint was made by means of contact measuring microscope (CMM). Then a comparison was done between optical non-contact methods (3D scanning profilometry and Fourier topography), the contact measuring method (CMM), simulations in Matlab and the gravimetry. Compared with the other methods, the 3D scanning profilometry was chosen as an optimal method for the measurement of hip implants. The 3D scanning profilometry was designed and implemented for determination of the volume loss of hip replacements. The experimental device was also used for measurements of a large number of hip replacements. The thesis presents two additional optical topographical methods implemented during the study. The first is the digital Ronchi test and the second is methodology of quality control of plastic moldings for the automotive industry.

The main contribution of this work is the detailed mapping of 3D scanning profilometry, the original experimental setup and its experimental implementation of practical measurements of a large number of volumetric loss of hip replacements. It has been for the time when an optical topography measurement method was used in this field of research. The results of the measurement are very important to study the issue. A modification of Ronchi test using spatial light modulator is another important benefit of the thesis, which increases the resolution of this method and it could explore the shape of the measured

optical surface in more detail. The Ronchi test is specifically used to measure the shape of spherical mirrors during their manufacture in the workplace of Joint laboratory of optics of Palacky University and The Institute of Physics AS CR and it is an important element in the production chain. All of presented results and methods are used in practice, for instance the topographical method dealing with measurement of plastic moldings for the automotive industry. The new knowledges and results were published and repeatedly accepted by the scientific community.

In the future, it is expected to continue in the co-operation with experts from Orthopaedic Clinic University Hospital in Olomouc and measure the loss of joint replacements. In the field of contactless optical methods we plan new realization of 3D scanning profilometry applications in industrial praxis. With pleasure we can say, that the Ronchi test is now an integrated part of the production process of optical elements in the workplace of Joint laboratory of optics of Palacky University and The Institute of Physics AS CR.

Literatura

- [1] T. Hill, A second book in geometry, Brewer and Tileston, 1863.
- [2] J. Enthoffer, Manual of topography, and text-book of topographical drawing: afor the use of officers of the army and navy, civil engineers, academies, colleges, and schools of science, D. Appleton & Co., 1870.
- [3] P. L. Shick, Topology: point-set and geometric, Wiley-Interscience, 2007, ISBN 0470096055, 9780470096055.
- [4] http://ptd.leica-geosystems.com/en/Leica-DISTO-DXT_81339.htm.
- [5] http://assets.fluke.com/manuals/411d____umeng0000.pdf.
- [6] <http://www.extech.com/instruments/resources/datasheets/DT300data.pdf>.
- [7] G. Bradshaw, Non-contact surface geometry measurement tehcnique, Image Synthesis Group, Trinity college, Doblin, 1999.
- [8] R. Bogue, Three-dimensional measurements: a review of technologies and applications, Sensor Review, Vol. 30 Iss: 2, pp.102 - 106, 2010.
- [9] L. M. Mugnier, Conoscopic holography: toward three-dimensional reconstructions of opaque objects,Appl. Opt. 34, 1363-1371 (1995) .
- [10] T. Sawatari, R. B. Zipin, Optical profile transducer, Optical Engineering, 18, 222, 1979.
- [11] T. Yoshizawa, A. Tochigi, Displacement measurement utilizing contrast variation of a projected pattern, Optical Engineering, 31, 1992, 1726.

- [12] R. Ferragallo, On Stereoscopic Painting, Leonardo, Vol. 7, No. 2 (Spring, 1974), pp. 97-104, ISSN 0024-094X.
- [13] K. Kraus, Photogrammetry: geometry from images and laser scans, de Gruyter, 2007, ISBN 978-3-11-019007-6.
- [14] V. N. Mahajan, Optical imaging and aberrations, SPIE Press, 1998, ISBN 9780819425157.
- [15] Y. Liu, R. Vogels, G. A. Orban, Convergence of Depth from Texture and Depth from Disparity in Macaque Inferior Temporal Cortex, The Journal of Neuroscience, April 14, 2004, 24(15):3795–3800, 3795.
- [16] A. Ecker, A. D. Jepson, K. N. Kutulakos, Semidefinite Programming Heuristics for Surface Reconstruction Ambiguities, Benchmarking Image Segmentation Algorithms, Int. J. Computer Vision, Vol. 85, No. 2, 2009, pp.167-181.
- [17] R. Bajcsy, L. Lieberman, Texture gradient as a depth cue, Computer Graphics and Image Processing, vol. 5, pp. 52-67, 1976.
- [18] Mitsuo Takeda and Kazuhiro Mutoh, Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-d Object Shapes, Applied Optics, Vol. 22, No. 24, Dec 1983.
- [19] Rössler T., Hrabovský M., Pluháček F.: Digital double-projector moiré topography. Experimentální analýza napětí 2004, 243-246, ISBN 80-239-2964-X.
- [20] D. Mandát, T. Rössler, M. Hrabovský, Phase analysis using Fourier transform profilometry, Experimental Stress Analysis 2005, 61-62, ISBN 80-214-2941-0.
- [21] S. K. Nayar, Y. Nakagawa, Shape from focus: an effective approach for rough surfaces, Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on, 13-18 May 1990, 218 - 225 vol.2, Cincinnati, OH, USA, ISBN: 0-8186-9061-5.
- [22] M. Subbarao, G. Surya, Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach, International Journal of Computer Vision, 13, 3, 271-294 (1994).

- [23] J. Bartl, R. Fira, M. Hain, Inspection of surface by the Moiré method, Measurement Science Review, Volume 1, Number 1, 2001, ISSN 1335 - 8871.
- [24] Mandát D., Rössler T., Hrabovský M., Gallo J., Aplikace optických topografických metod v medicíně. Acta Mechanica Slovaca, Košice, 2006. s. 327 - 332.
- [25] A.Asundi, W. Zhou, Mapping algoritm for 360-deg profilometry with time delayed integration imaging. Optical Engineering 38 (1999), 339-343.
- [26] L.Nožka, D. Mandát, M. Hrabovský, The 3D optical scanning topography, Theory and application, ACTA UNIV, PALACKI. OLOMOUC, Fac. rep. nat. (2003-2004, Physica 42-43, 185-194.
- [27] M. Hrabovsky, Z. Bača, P. Horváth, Koherenční zrnitost v optice. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2001,ISBN 80-244-0286-6.
- [28] R. G. Dorsch, G. Häusler, J. M. Herrmann, Laser Triangulation : fundamental uncertainty in distance measurement, Applied Optics, vol 33, No. 7,1306-1314, March 1994.
- [29] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/OpticalAberrations.html>.
- [30] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/coma.html>.
- [31] <http://www.telescope-optics.net/coma.htm>.
- [32] <http://toothwalker.org/optics/spherical.html>.
- [33] <http://posec.astro.cz/view.php?cislocclanku=2006020804>.
- [34] P. Malý, Optika, Vydavatelství Univerzita Karlova v Praze, 2008, ISBN 978-80-246-1342-0.
- [35] J. G. Fryer, D. C. Brown, Lens distortion for close-range photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (ISSN 0099-1112), vol. 52, Jan. 1986, p. 51-58.

- [36] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence archive, Volume 14 Issue 10, October 1992.
- [37] I. Powell, Design of laser beam line expander, Applied Optics, vol. 20, No. 17, 3705 - 3709.
- [38] <http://www.newport.com/images/webDocuments-EN/images/12622.pdf>.
- [39] <http://www.newport.com/images/webDocuments-EN/images/12577.pdf>.
- [40] <http://www.newport.com/images/webDocuments-EN/images/14341.pdf>.
- [41] http://www.framos.eu/lu120lu125.html?&no_cache=1&L=0.
- [42] Gallo, J., Kamínek, P., Zapletalová, J., Čechová, I., Špička, J., Ditmar, R.: Je osteolýza kolem stabilní TEP kyčelního kloubu asymptomatická? Acta Chir orthop Traum čech, 71: 20-25, 2004.
- [43] <http://www.artroza.com/koxartroza.html>.
- [44] T. Trč, Nové trendy v aloplastice kyčelního kloubu, Lékařské listy, příloha Zdravotnických novin, č. 15/2008, s. 18-21.
- [45] P. F. Gomez, J. A. Morcuende, Early Attempts at Hip Arthroplasty, Iowa Orthop J. 2005; 25: 25–29, ISSN 1555-1377.
- [46] T. Mizoue, K. Yamamoto, T. Masaoka, A. Imakiire, M. Akagi, I. C. Clarke, Validation of acetabular cup wear volume based on direct and two-dimensional measurements: hip simulator analysis, Journal of Orthop Science (2003) 8:491–499, ISSN: 0949-2658.
- [47] J. M. Kabo, J. S. Gebhard, G. Loren, In vivo wear of polyethylene acetabular components. Journal Bone Joint Surgery British volume, 1993, 75, 254-258, ISSN: 0301-620X.
- [48] J. Hashimoto, TW. Bauer, M. Jiang, Polyethylene wear in total hip arthroplasty: volumetric wear measurement of retrieved acetabular components, the 41th Annual Meeting Orthopaedic Research Society, 1995, p 116–20.

- [49] <http://www.shorewestern.com/hip.html>.
- [50] I. J. Charnley, DK. Halley: Rate of wear in total hip re placement. Clin Orthop 112:170, 1975.
- [51] R. W. McCalden, D. D. Naudie, X. Yuan, R. B. Bourne, Radiographic Methods for the Assessment of Polyethylene Wear After Total Hip Arthroplasty, Journal Of Bone and Joint Surgery, 2005, 87, 2323-2334, ISSN: 0021-9355.
- [52] A. Berzins, D. R. Sumner, J. O. Galante, Dimensional characteristics of uncomplicated autopsy-retrieved acetabular polyethylene liners by ultrasound. Journal of Biomedical Materials Research, 39, 1998, 120–129, ISSN : 1549-3296.
- [53] T. Masaoka, I. C. Clarke, K. Yamamoto, J. Tamura, P. A. Williams, V. D. Good, H. Shoji, A. Imakiire, Validation of volumetric and linear wear-measurement in UHMWPE cups—a hip simulator analysis, Wear, Volume 254, Issues 5-6, March 2003, Pages 391-398, ISSN 0043-1648.
- [54] J. Gallo, V. Havranek, J. Zapletalova, D. Mandat, Measurement of Acetabular Polyethylene Wear, Using a Universal Measuring Microscope, in Total Hip Replacement, Intra- and Inter-Observer Measurement Variability, ACTA CHIRURGIAE ORTHOPAEDICAE ET TRAUMATOLOGIAE ČECHOSL., 73, 2006, p. 28–33.
- [55] T. Rossler, D. Mandat, J. Gallo, M. Hrabovsky, M. Pochmon, V. Havranek, Optical 3D methods for measurement of prosthetic wear of total hip arthroplasty: principles, verification and results. 20 July 2009 / Vol. 17, No. 15 / OPTICS EXPRESS 12723.
- [56] THE PIERRE AUGER COLLABORATION. Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby Extragalactic objects. Science, 2007, vol. 318, no. 5852, pp. 938-943, 0036-8075.
- [57] Malacara, D., Optical shop testing. New York: Wiley, 1992. 792s. ISBN 978-0471522324.
- [58] Upton, J.D., The Matching Ronchi Test. 2001. <http://www.atm-workshop.com/ronchi-test.html>.

- [59] Smith, P.J., Only treats concave mirrors Roncigrams.
http://www.users.bigpond.com/PJIFL/ronchi_interpretation_basic.html.
- [60] Cornejo A., Malacara D., Ronchi Test of Aspherical Surfaces, Analysis, and Accuracy, Appl. Opt. 9, 1897-1901 (1970).
- [61] Santiago, R., Topographic measurements of non-rotationally symmetrical concave surfaces using Ronchi deflectometry. (Ph.D. thesis) 1999. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [62] Goodman, J.W., Introduction to Fourier Optics. New York, McGraw-Hill, 1968.
- [63] Surrel, Y., Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping. Appl. Optics, 1996, vol. 35, str. 51 - 60.
- [64] Omura, K., Yatagai, T., Phase measuring Ronchi test. Appl. Optics, 1988, vol. 27, str. 523 - 528.
- [65] Hibino K., Farrant D. I., Ward B. K., Oreb B. F., Dynamic range of Ronchi test with a phase-shifted sinusoidal grating, Appl. Opt. 36, 6178-6189 (1997).
- [66] Mandat, D., Nozka, L., Hrabovsky, M., Pech, M., Shape analysis of mirrors for Pierre Auger Project using Ronchi test. In 24th DANUBIA-ADRIA Symposium on Developments in Experimental Mechanics: Sibiu, Romania. Descrierea CIP a Bibliotecii Nationale a României, Sibiu, 2007, p. 81-82, ISBN 978-973-739-456-9.
- [67] Mandát, D., Pech, M., Hrabovky, M., Pochmon, M., Rössler, T., Defektoskopie plastových výlisků pro automobilový průmysl. Experimentální Analýza Napětí 2007, ISBN 978-80-7043-552-6.

Kapitola 10

Autorovy publikace

V příloženém seznamu jsou autorovy publikace vzniklé v průběhu studia řazené dle roku vydání.

2003 – 2004

1. NOŽKA L., MANDÁT D., HRABOVSKÝ M.: 3D optická skenovací topografie. (1) Sborník z 41. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2003“, 3.–5.6.2003, Milovy, CD ROM, velikost 714 381 B, 1-8. (2) Sborník anotací z 41. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2003“, 3.–5.6.2003, Milovy, (2003) 71-72, ISBN 80-214-2314-5.
2. MANDÁT D., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M.: Analýza obrazových dat 3D topografie. (1) Sborník z 41. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2003“, 3.–5.6.2003, Milovy, CD ROM, velikost 742 952 B, 1-7. (2) Sborník anotací z 41. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2003“, 3.–5.6.2003, Milovy, (2003) 61-62, ISBN 80-214-2314-5.
3. MANDÁT D., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M.: Analýza úbytku hmoty kloubních jamek kyčelních kloubů. Sborník z 42. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2004“, 1.-3.6.2004, Kašperské hory, (2004), 159-162, ISBN 80-239-2964-X.
4. MANDÁT D., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M., BARTONĚK L.: Measurement of abrasion of artificial cotyles using 3D optical scanning topography. *Proc. of the 21st*

Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, September 29 – October 2, 2004, Brijuni/Pula, Croatia, (2004) 92-93, ISBN 953-96243-6-3

5. PECH M., HRABOVSKÝ M., SCHOVÁNEK P., KŘEPELKA J., PALATKA M., NOŽKA L., MANDÁT D., RÖSSLER T., ŘÍDKÝ J., BOHÁČOVÁ M.: SOME EXPERIENCES WITH TESTING OF REFLECTING LAYERS ON MIRRORS FOR THE PROJECT PIERRE AUGER. *Proc. of The Ninth Scientific and Business Conference "SILICON 2004"*, November 2 – 5, 2004, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika, (2004) 224-230,
6. NOŽKA L., MANDÁT D., HRABOVSKÝ M.: The 3D optical scanning topography, theory and application, *ACTA UP Olomucensis, Fac. Rer. Nat., Physica*, , 42-43 (2003-2004) 185-194, ISSN 0231-9772,

2005

7. NOŽKA L., SCHOVÁNEK P., PALATKA M., HRABOVSKÝ M., ŘÍDKÝ J., VACEK V., BOHÁČOVÁ M., PECH M., DOUBRAVA M., MANDÁT D.: Czech contribution to the project AIRFLY. *Jemná mechanika a optika* 1 (2005) 11-13, ISSN 0447-6441, IF 0.
8. PECH M., HRABOVSKÝ M., SCHOVÁNEK P., PALATKA M., NOŽKA L., MANDÁT D., ŘÍDKÝ J.: Preliminary design of ultralight mirrors system for LIDAR. *Jemná mechanika a optika* 1 (2005) 8-10, ISSN 0447-6441, IF 0.
9. MANDÁT D., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M., Rössler T.: Differences of the application of profilometry and topography for the cotyle implantate shape measurement. *Jemná mechanika a optika* 1 (2005) 23-26, ISSN 0447-6441, IF 0.
10. MANDÁT D., Rössler T., Hrabovský M.: Phase analysis using Fourier transform profilometry. (1) *Sborník abstraktů ze 43.mez.konf. "Experimental Stress Analysis 2005"*, 7.-9.6.2005, Skalský Dvůr, 61-62, ISBN 80-214-2941-0; (2) *Sborník referátů ze 43. mez. konf. "Experimental Stress Analysis 2005"*, 7.-9.6.2005, Skalský Dvůr, CD 255 kB - 5 str.

11. RÖSSLER T., MANDÁT D., HRABOVSKÝ M.: Review of the topographic and profilometric methods developed in the Joint laboratory of Optics in Olomouc. (1) *Sborník abstraktů ze 43.mez.konf. "Experimental Stress Analysis 2005"*, 7.-9.6.2005, Skalský Dvůr, 75-76, ISBN 80-214-2941-0; (2) *Sborník referátů ze 43. mez. konf. "Experimental Stress Analysis 2005"*, 7.-9.6.2005, Skalský Dvůr, CD 162 kB - 2 str. (stejný text).
12. MANDÁT D., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M.: Measurement of abrasion of polyethylene TEP cotyles ABG I of coax using optical scanning topography. *Proc. of „14th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics“*, 13-17 September, 2004, Nitra, Slovak Republic, SPIE 5945 (2005) 4 s. ISBN 0-8194-5951-8.
13. SCHOVÁNEK P., PALATKA M., HRABOVSKÝ M., PECH M., NOŽKA L., MANDÁT D., ŘÍDKÝ J.: The prototype of ultralight mirror systém for LIDAR. *Proc. of Optics and Photonics 2005: Optical Components and Systems Engineering and Advanced Metrology*, 31 July-4 August 2005, San Diego, California, USA, CD ROM, SPIE 5869, 12 s., 798 kB. ISBN není.
14. RÖSSLER T., MANDÁT D., HRABOVSKÝ M.: Double-projector Fourier profilometry: improving the moiré topography using the determination of phase. *In 22nd Danubia-Adria symposium on Experimental Method in Solid Mechanics, Proceedings of Extended abstracts*, September 28 – October 1, 2005, Monticelli Terme – Parma, Italy. (2005), pp. 72-73.

2006

15. VACEK V., DOUBRAVA M., NOŽKA L., HRABOVSKÝ M., ŘÍDKÝ J., SCHOVÁNEK P., PALATKA M., BOHÁČOVÁ M., PECH M., MANDÁT D.: Chamber with controlled atmosphere for the project AIRFLY. *Jemná mechanika a optika 2* (2006) 51-54. ISSN 0447-6441.
16. JELÍNEK M., PROUZA M., KUBÁNEK P., HUDEC R., NEKOLA M., ŘÍDKÝ J., GRYGAR J., BOHÁČOVÁ M., CASTRO-TIRADO A. J., GOROSABEL

- J., HRABOVSKÝ M., MANDÁT D., NOSEK D., NOŽKA L., PALATKA M., PANDEY S. B., PECH M., SCHOVÁNEK P., ŠMÍDA R., TRÁVNÍČEK, DE UGARE POSTIGO A., VÍTEK S.: The bright optical flash from GRB 060117*. *Astronomy & Astrophysics* manuscript No. AA- 2006-5092-5. ISSN 0004-6361. IF 4.223
17. POCHMON M., RÖSSLER T., MANDÁT D., HRABOVSKÝ M., GALLO J.: Vybrané biomedicínské aplikace Fourierovské profilometrie. *Acta Mechanica Slovaca* **1** (2006) 401-404. ISSN 1335- 2393.
 18. MANDÁT D., Rössler T., Hrabovský M., Gallo J.: Aplikace optických topografických metod v medicíně. *Acta Mechanica Slovaca* **1** (2006) 327-332. ISSN 1335-2393.
 19. Rössler T., MANDÁT D., POCHMON M.: Využití dataprojektoru pro projekci světelné mřížky v optických 3D metodách. *Acta Mechanica Slovaca* **1** (2006) 457-462. ISSN 1335-2393.
 20. MANDÁT D., POCHMON M., HRABOVSKÝ M., RÖSSLER T.: Srovnání simulace opotřebení kloubních implantátů s výsledky jeho měření pomocí optických 3D metod. *Jemná mechanika a optika* 11-12 (2006) 297-299. ISSN 0447-6441.
 21. MANDÁT D., RÖSSLER T., HRABOVSKÝ M., POCHMON M., Gallo J.: Validation of 3D profilometry using total knee arthroplasty samples. Book of Abstracts *XV-th Czech-Polish-Slovak Optical Conference – Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics*. September 11 – 15, 2006, Technical University Liberec, Czech Republic. (2006) 76, ISBN 80-86742-13-X.
 22. PECH M., HRABOVSKÝ M., SCHOVÁNEK P., MANDÁT D., NOŽKA L.: Shape measurement method of concave mirrors. Book of Abstracts *XV-th Czech-Polish-Slovak Optical Conference – Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics*. September 11 – 15, 2006, Technical University Liberec, Czech Republic. (2006) 89, ISBN 80-86742-13-X.
 23. POCHMON M., RÖSSLER T., MANDÁT D., Gallo J., Hrabovský M.: Verification of abrasion measurement of juncture implants using Fourier profilometry. Book of

Abstracts *XV-th Czech- Polish-Slovak Optical Conference – Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics*. September 11 – 15, 2006, Technical University Liberec, Czech Republic. (2006) 91, ISBN 80- 86742-13-X.

24. Rössler T., Pochmon M., Mandát D., Hrabovský M.: Calibration of profilometric and topographic methods using the measurement of the prism standard. Book of Abstracts *XV-th Czech-Polish-Slovak Optical Conference – Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics*. September 11 – 15, 2006, Technical University Liberec, Czech Republic. (2006) 92, ISBN 80-86742-13-X.

2007

25. THE PIERRE AUGER COLLABORATION. Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby Extragalactic objects, **Science**, 2007, vol. 318, no. 5852, pp. 938-943, ISSN 0036-8075.
26. MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PECH, M.: Analýza a výpočtové algoritmy pro zpracování Ronchi testu. *Zpráva č. 302/SLO/2007, SLO UP a FZÚ AV ČR Olomouc, 2007.*
27. MANDÁT, D.; PECH, M.; HRABOVSKÝ, M.; POCHMON, M.; RÖSSLER, T. *Defektoskopie plastových výlisků pro automobilový průmysl. In ADÁMEK, V.; ZAJÍČEK, M.; KÁŇA, J. (eds.) Experimentální Analýza Napětí 2007: Hotel Výhledy, Česká Rep., 4.-7. 2007. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, CD-ROM, 4 s., ISBN 978-80-7043-552-6*
28. POCHMON, M.; RÖSSLER, T.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; GALLO, J. *Measuring of the abrasion of cotyle implant using Fourier profilometry using sequential drawing of grating. In ADÁMEK, V.; ZAJÍČEK, M.; KÁŇA, J. (eds.) Experimentální Analýza Napětí 2007: Hotel Výhledy, Česká Rep., 4.-7. 2007. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, CD-ROM, 4 s., ISBN 978-80-7043-552-6*
29. BENZVI, S.; BOHÁČOVÁ, M.; CONNOLLY, B.; GRYGAR, J.; HRABOVSKÝ, M.; KÁROVÁ, T.; MANDÁT, D.; NEČESAL, P.; NOSEK, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; PROUZA, M., ŘÍDKÝ, J.; SCHOVÁNEK,

- P.; ŠMÍDA, R.; TRÁVNÍČEK, P.; VITALE, P.; for The Pierre Auger Collaboration. New method for atmospheric calibration at the Pierre Auger Observatory using FRAM, a robotic astronomical telescope. In 30th International Cosmic Ray Conference ICRC'07: Mérida, Mexico, July 3-11, 2007.*
30. PECH, M.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L. *Shape measurement method of concave mirrors. In MILER, M.; SENDERÁKOVÁ, D.; HRABOVSKÝ, M. (eds.) 15th Czech-Polish-Slovak Conference on Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics: Liberec, Czech Republic, 11-15 September, 2006. Washington. SPIE Vol. 6609, 2007, s. 660918-1 – 660918-5.*
31. MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; HRABOVSKÝ, M.; PECH, M. *Shape analysis of mirrors for Pierre Auger Project using Ronchi test. In 24th DANUBIA-ADRIA Symposium on Developments in Experimental Mechanics: Sibiu, Romania, September 19-22, 2007. Descrierea CIP a Bibliotecii Nationale a României, Sibiu, 2007, s. 81-82, ISBN 978-973-739-456-9.*
32. RÖSSLER, T.; POCHMON, M.; MANDÁT, D.; HAVRÁNEK, V.; HRABOVSKÝ, M.; GALLO, J. *Validation of the measurement of the prosthetic wear of the total hip arthroplasty by means of the optical 3D methods. In 24th DANUBIA-ADRIA Symposium on Developments in Experimental Mechanics: Sibiu, Romania, September 19-22, 2007. Descrierea CIP a Bibliotecii Nationale a României, Sibiu, 2007, s. 29-30, ISBN 978-973-739-456-9.*
33. PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; ŘÍDKÝ, J.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M. *Zrcadlový systém pro atmosférický LIDAR. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury, detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2006, s. 106-108, ISBN 80-244-1544-5.*
34. PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; ŘÍDKÝ, J.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M. *Zrcadla pro pionový spektrometr DIRAC. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury, detekční systémy a související*

technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2006, s. 109-110, ISBN 80-244-1544-5.

2008

35. GALLO, J.; HAVRÁNEK, V.; ZAPLETALOVÁ, J.; MANDÁT, D. Měření otěru polyethylenových jamek TEP kyčelního kloubu univerzálním měřícím mikroskopem. *Acta Chirurgiae Orthopaedicae et Traumatologiae Čechoslovaca*, 2006, vol. 73, no. 1, pp. 28-33. ISSN 0001-5415
36. MANDÁT, D.; PECH, M.; HRABOVSKÝ, M.; RÖSSLER, T. Roughness measurement by means of optical methods. (1) In FUXA, J.; MACURA, P.; HALAMA, R.; KUBALA, R.; FRYDRÝŠEK, K.; FUSEK, M.; VÁCLAVEK, L.; LENERT, J.; ADÁMKOVÁ, L.; FOJTÍK, F.; ROJÍČEK, J. (Eds.) *Proc. of the 46th Internat. Scientific Conf. „Experimental Stress Analysis“*, June 2-5, 2008, Horní Bečva: VŠB-TU Ostrava, 2008, 159-162, ISBN 978-80-248-1774-3; (2) CD-ROM, VŠB-TU Ostrava, 2008.
37. PECH, M.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. New shape measurement method of concave mirrors on digital processing of Hartmann test principles. (1) In FUXA, J.; MACURA, P.; HALAMA, R.; KUBALA, R.; FRYDRÝŠEK, K.; FUSEK, M.; VÁCLAVEK, L.; LENERT, J.; ADÁMKOVÁ, L.; FOJTÍK, F.; ROJÍČEK, J. (Eds.) *Proc. of the 46th Internat. Scientific Conf. „Experimental Stress Analysis“*, June 2-5, 2008, Horní Bečva: VŠB-TU Ostrava, 2008, 187-190, ISBN 978-80-248-1774-3; (2) CD-ROM, VŠB-TU Ostrava, 2008..
38. MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; HAVRÁNEK, V.; POCHMON, M.; RÖSSLER, T.; GALLO, J. Sensor for measurement of wear in total hip arthroplasty. (1) *IFMBE Proceeding KATASHEV, A.; DEKHTYAR, Y.; SPIGULIS, J. (Eds.) NBC – 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics*, 16-20 June 2008, Riga, Latvia: IFMBE, Springer, CD ROM, 2008, 380-382, ISBN 978-3-540-69366-6. (2) *Book of Abstracts 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics: Riga Technical University, Riga*, 2008, pp. 380-382, ISBN 978-9984-32-231-5.

39. POCHMON, M.; RÖSSLER, T.; GALLO, J.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; HAVRÁNEK, V. *Potentialities of wear measurement in total knee arthroplasty. (1) IFMBE Proceeding KATASHEV, A.; DEKHTYAR, Y.; SPIGULIS, J. (Eds.) NBC – 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics, 16-20 June 2008, Riga, Latvia: IFMBE, Springer, CD ROM, 2008, 390-392, ISBN 978-3-540-69366-6. (2) Book of Abstracts 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics: Riga Technical University, Riga, 2008, pp. 390-392, ISBN 978-9984-32-231-5.*
40. RÖSSLER, T.; GALLO, J.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; POCHMON, M.; HAVRÁNEK, V. *Optical non-contact in-vitro measurement of total hip arthroplasty wear. (1) IFMBE Proceeding KATASHEV, A.; DEKHTYAR, Y.; SPIGULIS, J. (Eds.) NBC – 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics, 16-20 June 2008, Riga, Latvia: IFMBE, Springer, CD ROM, 2008, 393-396, ISBN 978-3-540-69366-6. (2) Book of Abstracts 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics: Riga Technical University, Riga, 2008, pp. 393-396, ISBN 978-9984-32-231-5.*
41. MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; PALATKA, M.; PECH, M.; NOŽKA, L.; HALENKA, V.; MAREK, M. *Teleskop s velkou elevací – HEAT. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury, detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2007, s. 123-127, ISBN 978-80-244-1844-5.*
42. NOŽKA, L.; HRABOVSKÝ, M.; ŘÍDKÝ, J.; BOHÁČOVÁ, M.; SCHOVÁNEK, P.; PALATKA, M.; PECH, M.; MANDÁT, D. *Měření fluorescenčního zisku a spektra dusíku pomocí teplotní komory v projektu AIRFLY. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury, detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2007, s. 128-133, ISBN 978-80-244-1844-5.*
43. PECH, P.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L. *Měření tvaru ultratenkých zrcadel. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury,*

detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2007, s. 146-150, ISBN 978-80-244-1844-5.

44. RÖSSLER, T.; GALLO, J.; HRABOVSKÝ, M.; POCHMON, M.; MANDÁT, D.; HAVRÁNEK, V. *Optické 3D metody pro měření otěru u totální náhrady kyčle: principy a výsledky. In KŘEPELKA, J. (ed.) Optické struktury, detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace. Olomouc: UP Olomouc, 2007, s. 155-159, ISBN 978-80-244-1844-5.*

2009

45. RÖSSLER, T.; MANDÁT, D.; GALLO, J.; HRABOVSKÝ, M.; POCHMON, M.; HAVRÁNEK, V. *Optical 3D methods for measurement of prosthetic wear of total hip arthroplasty: principles, verification and results. Optics Express, 2009, Vol. 17, No. 15, pp. 12723-12730. ISSN 1094-4087. IF 3.880. DOI:10.1364/OE.17.012723*
46. ABRAHAM, J. et al. AUGER COLLABORATION - BOHÁČOVÁ, M.; CHUDOBA, J.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; KÁROVÁ, T.; NEČESAL, P.; PALATKA, M.; PECH, M.; PROUZA, M.; ŘÍDKÝ, J.; SCHOVANCOVÁ, J.; SCHOVÁNEK, P.; ŠMÍDA, R.; TRÁVNÍČEK, P. *Limit on the diffuse flux of ultrahigh energy tau neutrinos with the surface detector of the Pierre Auger Observatory. Phys Rev D, 2009, Vol. 79, No. 10, pp. 102001(1) - 102001(15). ISSN: 1550-7998. IF 5.050.*
47. NOŽKA, L.; HRABOVSKÝ, M.; ŘÍDKÝ, J.; BOHÁČOVÁ, M.; SCHOVÁNEK, P.; PALATKA, M.; PECH, M.; MANDÁT, D.; for AIRFLY Collaboration. *Temperature chamber for measurement of fluorescence yield and nitrogen spectrum in the project AIRFLY. Optik, 2009, Vol. 120, pp. 619-622. ISSN: 0030-4026. IF 0.507. DOI:10.1016/j.ijleo.2008.02.008*
48. THE PIERRE AUGER COLLABORATION; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al. *Atmospheric effects on extensive air showers observed*

with the surface detector of the Pierre Auger Observatory. Astropart. Phys. , 2009, Vol. 32, pp. 89-99. ISSN 0927-6505. IF 3.388.

49. COPPENS, J.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. *et all for THE P. AUGER COLLABORATION. Observation of radio signals from air showers at the Pierre Auger Observatory, Proc. 3rd Int. Workshop on the Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities, May 25 - 27, 2008, Rome, Italy, Nucl. Instr. Meth. A (Proc. Suppl.), 604 (2009) S41-S43. ISSN 0168-9002. IF 1.019.*
50. ALVAREZ-MUNITZ, J.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. *et all for THE P. AUGER COLLABORATION. Recent results from the Pierre Auger Observatory. Proc. 3rd Int. Workshop on the Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities, May 25 - 27, 2008, Rome, Italy, Nucl. Instr. Meth. A (Proc. Suppl.) 604 (2009) S30-36. ISSN 0168-9002. IF 1.019.*
51. RAUTENBERG, J.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. *at all for THE P. AUGER COLLABORATION. Radio in Auger -offline. Proc. 3rd Int. Workshop on the Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities, May 25 - 27, 2008, Rome, Italy, Nucl. Instr. Meth. A (Proc. Suppl.) 604 (2009) S44-S45. ISSN 0168-9002. IF 1.019. .*
52. REVENU, B.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. *et all for THE P. AUGER AND CODALEMA COLLABORATION. Radiodetection of cosmic air showers with autonomous radio detectors installed at the Pierre Auger Observatory. Proc. 3rd Int. Workshop on the Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities, May 25 - 27, 2008, Rome, Italy, Nucl. Instr. Meth. A (Proc. Suppl.) 604 (2009) S37-S40. ISSN 0168-9002. IF 1.019.*
53. ROVERO, A. C.; BAULEO, P.; BRACK, J. T.; HARTON, J. L.; KNAPIK, R.;

HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. at all for THE P. AUGER COLLABORATION. Multi-wavelength calibration procedure for the Pierre Auger Observatory Fluorescence Detectors. *Astropart. Phys.*, 2009, Vol. 31, pp. 399-406. ISSN 0927-6505. IF 3.388.

54. MANDÁT, D.; PALATKA, M.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; PECH, M. Projekt HEAT (High Elevation Auger Telescopes). *Jemná mechanika a optika*, 2009, vol. 54, no. 3, pp. 90-91. ISSN 0447-6441
55. HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; MAREK, M.; KOČNAR, A.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P. Výsledky projektu Pierre Auger v časopise Science. In KŘEPELKA, J. (ed.) *Optické struktury, detekční systémy a související technologie pro nízkofotonové aplikace*. Olomouc: UP Olomouc, 2008, s. 175-179, ISBN 978-80-244-2122-3
56. RÖSSLER, T.; MANDÁT, D.; GALLO, J.; HRABOVSKÝ, M.; POCHMON, M.; HAVRANEK, V. Sensor of total hip arthroplasty wear designed on principle of scanning profilometry. In POPIOLEK-MASAJADA, A.; JANKOWSKA, E.; URBANCZYK, W. (eds.) *16th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, 8 - 12 September 2008, Polanica Zdroj, Poland*. SPIE Vol. 7141, 2008, pp. 71411E(1)-71411E(8), ISBN 9780819473837. DOI: 10.1117/12.822395

2010

57. PECH, M.; MANDÁT, D.; PALATKA, M.; ČEPL, M.; KOCIÁN, L.; KRATOCHVÍL, A.: Systém pro monitorování pozadí noční oblohy observatoře Pierre Auger. Zpráva č. 370/SLO/2010, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2010.
58. PECH, M.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; PALATKA, M.; SCHOVÁNEK, P. Shape parameters measurement of ultralight mirrors. *Optik*, 2010, Vol. 121, pp. 1881-1884. DOI:10.1016/j.ijleo.2009.05.008. ISSN 0030-4026. IF 0.378.

59. *HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. A study of the effect of molecular and aerosol conditions in the atmosphere on air fluorescence measurements at the Pierre Auger Observatory. Astropart. Phys. , 2010, Vol. 33, pp. 108-129. ISSN 0927-6505. IF 4.136. DOI:10.1016/j.astropartphys.2009.12.005*
60. *HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 1018 e. Phys. Rev. Lett., 2010, Vol. 104, pp. 091101-1-091101-7. ISSN 0031-9007. IF 7,328. DOI:10.1103/PhysRevLett.104.091101*
61. *HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 1018 eV using the Pierre Auger Observatory. Phys. Lett. B, 2010, Vol. 685, pp. 239-246. ISSN 0370-2693. IF 5.083. DOI: 10.1016/j.physletb.2010.02.013*
62. *BLÜMER, J.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. The northern site of the Pierre Auger Observatory. New Journal of Physics, 2010, Vol. 12, pp. 035001-1- 035001-21. DOI: 10.1088/1367-2630/12/3/035001, ISSN 1367-2630. IF 3.312*
63. *HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research A, 2010, Vol. 613, pp. 29-39. DOI:10.1016/j.nima.2009.11.018. ISSN 0168-9002. IF 1.317*

64. *HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter. Astropart. Phys. , 2010, Vol. 34, pp. 314-326. ISSN 0927-6505. IF 4.136. DOI:10.1016/j.astropartphys.2010.08.010*
65. *HUEGE, T.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Radio detection of cosmic rays in the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research A, 2010, Vol. 617, pp. 484-487. DOI:10.1016/j.nima.2009.10.012. ISSN 0168-9002. IF 1.317*
66. *TONACHINI, A. S.; HALENKA, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. Atmospheric monitoring with the LIDAR network of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research A, 2010, Vol. 617, pp. 517-519. DOI:10.1016/j.nima.2009.10.027. ISSN 0168-9002. IF 1.317*
67. *PECH, M.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; MAREK, M.; PALATKA, M.; SCHOVÁNEK, P. Introduction to Roughness ASR Measurement Method with Mirror Roughness Measurement Example. In ŠMÍD, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M. (Eds.) 48th International Scientific Conference „Experimentální Analýza Napětí 2010“, Velké Losiny, Czech Republic, May 31-June 3, 2010. Olomouc: 2010, s. 319-323. ISBN 978-80-244-2533-7.*
68. *MANDÁT, D.; PECH, M.; PALATKA, M.; NOŽKA, L.; NOVÁKOVÁ, P.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Measurement of scattering properties of ultrathin glass mirrors. In VOJTĚCHOVSKÝ, K. (ed.) The Twelfth Scientific and Business Conference SILICON 2010, November 2-5, 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic. TECON: 2010, pp. 419-425, ISBN 978-80-254-7361.*
69. *PALATKA, M.; MANDÁT, D.; PECH, M.; NOŽKA, L.; NOVÁKOVÁ, P.; MA-*

REK, M.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Near UV filter optical properties. In VOJTĚCHOVSKÝ, K. (ed.) *The Twelfth Scientific and Business Conference SILICON 2010, November 2-5, 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic. TECON: 2010, pp. 403-418, ISBN 978-80-254-7361.*

70. NOŽKA, L.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; PECH, M.; PALATKA, M.; NYKLÍČEK, M.; ŘIDKÝ, J.; TRÁVNÍČEK, P.; EBR, J.; PROUZA, M.; NEČESAL, P. Condition of mirror segments after 5 years of operation in Pierre Auger Observatory. GAP-2010-040.
71. PECH, M.; MANDÁT, D.; SCHOVÁNEK, P. Optická soustava pro měření tvaru konvexních odrazových ploch, zejména segmentů velkoplošných sférických zrcadel. Přihláška vynálezu č. PV 2008-255 ze dne 24.4.2008.

2011

72. HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. et al for The P. AUGER COLLABORATION. The exposure of the hybrid detector of the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics, 2010, vol. 34, pp. 368-381. ISSN 0927-6505. IF 4.136.*
73. NOŽKA, L.; PECH, M.; HIKLOVÁ, H.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; PALATKA, M. BRDF profile of Tyvek and its implementation in the Geant4 simulation Toolkit. *Optics Express, 2011, Vol. 19, No. 5, pp. 4199-4209. ISSN 1094-4087. IF 3.278*
74. HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. Advanced functionality for radio analysis in the Offline software framework of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, Vol. 635, pp. 92-102. ISSN 0168-9002. IF 1.317.*

75. HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. Search for first harmonic modulation in the right ascension distribution of cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics*, 2011, vol. 34, pp. 627-639. ISSN 0927-6505. IF 4.136.
76. HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. The Pierre Auger Observatory scaler mode for the study of solar activity modulation of galactic cosmic rays. *Journal of Instrumentation*, 2011, vol. 6, P01003. ISSN 1748-0221. IF 2.102.
77. BERTOU, X.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger Collaboration Background radiation measurement with water Cherenkov detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, Vol. 639, pp. 73–76. ISSN 0168-9002. IF 1.317.
78. SCHERINI, V.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger Collaboration, Search for ultra-high energy photons with the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 2011, Vol. 630, pp. 226–229, ISSN 0168-9002. IF 1.317.
79. TONACHINI, A. S.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger Collaboration, Atmospheric monitoring and its impact on air shower observables at the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, vol. 630, pp. 87–90. ISSN 0168-9002. IF 1.317.
80. ZAVRTANIK, D.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger Collaboration, Results from the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, vol. 630, pp. 166–170. ISSN 0168-9002. IF

1.317.

81. RODRIGUES, G.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.;
PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger
Collaboration, Measurement of the UHECR energy spectrum using the surface detec-
tor of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research A*, 2011, vol. 630, pp. 91–94. ISSN 0168-9002. IF 1.317.
82. VALORE, L.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.;
PALATKA, M.; PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger
Collaboration, Atmospheric aerosol characterization using the central laser facility
at the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Re-
search A*, 2011, vol. 630, pp. 246–250. ISSN 0168-9002. IF 1.317.
83. Bruce R. Dawson, HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.;
PALATKA, M.; PECH, M.; The UHE cosmic ray energy spectrum measured by the
Pierre Auger Observatory, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 212–213 (2011) 87–92,
ISSN: 0920-5632
84. J. R. Martino HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.;
PECH, M.; Operation of the Pierre Auger Observatory, *Nuclear Physics B (Proc.
Suppl.)* 212–213 (2011) 93–96, ISSN: 0920-5632
85. V. Scherini, HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.;
PECH, M.; Search for primary photons and neutrinos in the ultra-high energy
cosmic rays with the Pierre Auger Observatory, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*
212–213 (2011) 115–120, ISSN: 0920-5632
86. Piera L. Ghia, HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.;
PALATKA, M.; PECH, M.; On the arrival directions of the highest energy cosmic
rays detected by the Pierre Auger Observatory *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*
212–213 (2011) 207–212, ISSN: 0920-5632
87. HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.;
PECH, M.; RÖSSLER, T.; SCHOVÁNEK, P. for the Pierre Auger Collaboration;

Anisotropy and chemical composition of ultra-high energy cosmic rays usány arrival directions measured by the Pierre Auger Observatory, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* , June 2011, 022 , ISSN: 1475-7516 , IF = 6,49

88. *L. NOZKA, P. SCHOVANEK, M. HRABOVSKY, D. MANDAT, M. PECH, M. PALATKA, M. NYKLICEK, J. RIDKY, P. TRAVNICEK, J. EBR, M. PROUZA, P. NEČESAL* ;; Condition of mirror segments after 5 years of operation in Pierre Auger Observatory, GAP note 2010-040.
89. *D. MANDAT, M. PECH, M. PALATKA, L. NOZKA, M. HRABOVSKY, P. SCHOVANEK, J. RIDKY, P. TRAVNICEK, J. EBR, M. PROUZA, P. NEČESAL, J. VÍCHA*;; *AllSky camera for Pierre Auger Observatory – Bgcam*, GAP note 2011-008.
90. *D. MANDAT, M. PECH, P. SCHOVANEK, M. HRABOVSKY, P. HORVATH, M. PALATKA, L. NOZKA, J. RIDKY, P. TRAVNICEK, M. PROUZA*;; *Mirror cleaning of Coihueco telescopes in March 2011 – Bays 1, 4 and 6*, GAP note 2011-077.

Seznam obrázků

3.1	Odhad vzdálenosti pomocí zjištění velikosti paralaxy.	8
4.1	Měření na univerzálním měřicím mikroskopu Carl Zeiss Jena 2650	14
4.2	Měření vzdálenosti stanovením doby průchodu záření měřeným prostředím.	16
4.3	Měření vzdálenosti pomocí analýzy fázového posunu odraženého laserového záření od povrchu měřeného předmětu.	16
4.4	Dálkoměr založený na triangulační metodě.	17
4.5	Konoskopie - měření vzdálenosti pomocí dvojlomného krystalu.	18
4.6	Konoskopie - Princip měření.	19
4.7	Měření vzdálenosti pomocí detekce změny intenzity světla měřeného bodu	20
4.8	Měření vzdálenosti pomocí detekce kontrastu projektované struktury na povrch předmětu.	21
4.9	Princip profilovacího měření.	22
4.10	Popis principu stereoskopické metody.	24
4.11	Změna textury v závislosti na podkladu.	26
4.12	Geometrie Fourierovské profilometrie založené na detekci změny fáze periodické struktury.	28
4.13	Zobrazení bodu jednoduchou čočkou,	30
4.14	Vznik moiré proužků.	31
4.15	Výpočet parametru z v bodě měření O pomocí parametrů $\vartheta_1, \vartheta_2, \varpi$	32
4.16	Srovnání projekční moiré a stínové moiré.	33
5.1	Základní geometrie 3D skenovací profilometrie.	35
5.2	Citlivost metody v závislosti na parametrech L_0, ϖ_0	37

5.3	Citlivost metody v závislosti na parametru ϖ_0	38
5.4	Rozlišení experimentální sestavy	38
5.5	Geometrie triangulační metody	40
5.6	Závislost chyby měření na parametrech l_c a R_q	42
5.7	Schematické znázornění astigmatismu.	43
5.8	Schematické znázornění komy	44
5.9	Schematické znázornění sférické aberace.	44
5.10	Distorze obrazu.	45
5.11	Deformace vlnoplochy	47
5.12	Vliv deformace vlnoplochy na zobrazení bodu ležícího na optické ose.	47
5.13	Vliv deformace vlnoplochy na zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu.	48
5.14	Dva způsoby pohybu měřené předmětu při měření.	50
5.15	Změna kalibrační konstanty v ose y	52
5.16	Kalibrace osy z pomocí referenčních rovin	53
5.17	Průběh směrnice k a úseku q při fitování kalibračních dat	54
5.18	Idealizovaný snímek laserové stopy bez šumů	55
5.19	Analýza laserové stopy	56
5.20	Výpočet středu světelné stopy pomocí hledání maxima signálu.	58
5.21	Výpočet středu filtrovaného a nefiltrovaného signálu.	60
5.22	Průběh odpovídající intenzitě světla jednoho řádku testovaného snímku.	63
5.23	Prostorové frekvence v jednoho řádku zkoumaného obrázku.	63
5.24	Rekonstruovaný povrch pomocí prostorových frekvencí vypočítaných pomocí diskrétní Fourierovy transformace.	64
5.25	Srovnání průběhu rekonstrukce a výpočtu středu průběhu pomocí fitování Gaussovou funkcí.	64
5.26	Rozdíl objemu objektu při různých posunech projektované stopy.	66
5.27	Procentuální chyba výpočtu objemu tělesa	67
5.28	Deformace stopy projektované na měřený objekt při pootočení projektoru	68
5.29	Chyba určení objemu při natočení projektované stopy.	68
5.30	Kombinovaná chyba justování sestavy.	70

5.31	Vliv rotace a posunutí stopy na výslednou chybu stanovení objemu modelové jamky.	70
5.32	Projekce tenké laserové stopy pomocí expanze válcovou čočkou.	72
5.33	Různé typy a konfigurace expandérů pro tvorbu laserové stopy.	73
5.34	Expandér v kombinaci konicko-válcová plocha.	73
5.35	Rotační stolek PR50CC Newport Corporation.	74
5.36	Translační stolek ILS150CCL Newport Corporation.	74
5.37	Schéma komunikace a nastavení řídicí jednotky SMC100CC	75
5.38	Obrázek kamery Lumenera série LU1xx.	75
6.1	Kyčelní kloub.	77
6.2	Náhrada kyčelního kloubu.	78
6.3	Metody pro stanovení velikosti otěru kloubního implantátu.	80
6.4	Simulátor otěru kyčelního implantátu.	81
6.5	Úbytek hmoty v simulátoru pro různé velikosti jamky.	82
6.6	Srovnání metod vyhodnocení otěru kyčelních implantátů.	82
6.7	Výpočet otěru kyčelní jamky pomocí metody J. Charnley.	83
6.8	Stanovení lineárního opotřebení kyčelní jamky.	84
6.9	Použití speciální markerů pro stanovení přesné pozice jednotlivých komponent kyčelního implantátu.	85
6.10	Ultrazvukové měření objemového úbytku hmoty kyčelního implantátu.	86
6.11	Orientace souřadných os vzhledem k poloze jamky.	88
6.12	Princip měření otěru jamky pomocí univerzálního měřicího mikroskopu.	90
6.13	Způsob umělého definovaného opotřebení jamky kyčelního implantátu.	95
7.1	Kalibrační roviny.	102
7.2	Kalibrace jednoho řádku.	103
7.3	Rozdíly fitování kalibračních dat.	103
7.4	Rozdíly kalibračních dat.	104
7.5	Měření tvaru předmětu.	105
7.6	Tvar nepoškozené jamky.	106

7.7	Nepoškozená jamka.	106
7.8	Poškozená jamka.	107
7.9	Poškozená jamka II.	107
7.10	Poškozená jamka III.	108
8.1	Ronchi test LIDARu.	110
8.2	Souřadnicový systém Ronchi testu.	112
8.3	Graf závislosti vlnové délky zdroje a hustoty testu na zvoleném ohnisku objektivu CCD kamery.	115
8.4	Šíření paprsku od povrchu k záznamovému zařízení.	116
8.5	Sestava Ronchi testu.	119
8.6	Jednotlivé kroky analýzy naměřených dat.	123
8.7	Sestava digitálního Ronchi testu.	126
8.8	Ronchigramy plochy pro dvě orientace mřížek.	127
8.9	Výpočet průniků křivek.	127
8.10	Rekonstruovaný povrch zrcadla II/1604.	128
8.11	Ronchigramy sférického zrcadla.	128
8.12	Ronchigramy sférického zrcadla II.	129
8.13	Rozdíl rekonstruované plochy zrcadla a ideální.	129
8.14	Plocha zrcadla vypočítaná pomocí Ronchi testu.	130
8.15	Zalakované škrábance, kapky a praskliny.	133
8.16	Vady na nelakovaných površích.	133
B.1	Hlavní okno software pro ovládání měření a kalibrace.	179
B.2	Blokové schéma hlavního programu	181
B.3	Blokové schéma pro rotaci a synchronní focení snímku měřeného předmětu.	182
B.4	Posun v ose z.	183
B.5	Interface pro zpracování obrazu pomocí Matlabu.	184
B.6	Uložení a načtení nastavení měřicí sestavy.	184
C.1	Parametry použitého kamery Lumenera LU120 I.	186
C.2	Parametry použitého kamery Lumenera LU120 II.	187

C.3 Parametry použitého objektivu.	189
--	-----

Seznam tabulek

6.1	Tabulka měření jedním pozorovatelem. Vyhodnocení pomocí měření metodou stanovení posunutí dvou kružnic (Průměr kružnice) a výpočet posunutí dvou koulí (Minimální odchylka). P je vypočtený lineární otěr (lineární posun kloubní hlavičky femuru), Δ je nejistota měření.	92
6.2	Tabulka nezávislých měření dvou pozorovatelů VH - Vítězslav Havránek, DM - Dušan Mandát . Byly provedeny 3 sady měření během jednoho měsíce. V každé sadě bylo 10 jamek, které byly pro každou sadu stejné. parametr S.D. udává směrodatnou odchylku (Standard Deviation).	93
6.3	Parametry výpočtu objemového úbytku a vstupní parametry pro obrábění měřených jamek	96
6.4	Naměřené a vypočtené objemové úbytky pro dané metody	97
6.5	Srovnání vybraných topografických metod.	97
6.6	Relativní odchylky jednotlivých metod měření.	98
6.7	Směrodatná odchylka σ jednotlivých metod měření.	98

Příloha A

Programy a skripty vytvořené v prostředí Matlab

V přílohách jsou uvedeny vlastní kódy a skripty vytvořené v programu Matlab. Komentář je vždy vyznačen znaky % nebo %%.

A.1 Metoda výpočtu středu stopy

```
%% MODELOVANI STOPY POMOCI GAUSSE
```

```
x = 1:600;
```

```
A = 150;
```

```
b = 300 ;
```

```
c = 6;
```

```
y=1:600;
```

```
for i = 1:600
```

```
    a(i,:) = ((A)*exp(-(power((x-(b+randn)),2))/(2*power((c+rand),2)))));
```

```

end

b = abs(randn(600,600))*5;
a=a+b;

%% FIT GAUSSEM
tic

for i = 1:600
    p = fit(x(250:350)',a(i,250:350)', 'gauss1');
    stred(i) = p.b1;
end
toc

%% STRED POMOCI TEZISTE

addpath('/home/mandat/matlab/work/esp/')
for i = 1:600
    stred1(i) = teziste(a(i,:));
end
imagesc(a),colormap gray,hold on, plot(stred1,y,'-.r')

%% STRED POMOCI DFFT

for i = 1:600
    c = fft(a(i,:));
    c(1:580) = 0;
    c=abs(ifft(c));
    [k,l]=max(c);
    stred2(i) = l;
end

```

```

subplot (2,2,1)
imagesc(a),title ('model laserové stopy na stinitku s generaci sumu')
subplot(2,2,2)
plot(a(150,:)), title ('vykreslení průběhu intenzity
jednoho radku snimku')

subplot(2,2,3)
plot(stred,'--r'),hold on,plot(stred1,'-.g'),plot(stred2,'.-b'),
title ('zjistovani stredu stopy pomoci ruznych algoritmu bez prvotni
filtrace'),
legend ('Gauss fit', 'teziste','Fourierova filtrace',5)
subplot (2,2,4)
imagesc(a(150:180,280:320)),hold on, plot(stred(150:180)-280,1:31),
plot(stred1(150:180)-280,1:31,'k'),
hold off
legend ('Gauss fit','teziste')

```

A.2 Fourierova filtrace a rekonstrukce

```

figure;
mn = min(x); mx = max(x);
N = length(x);
rekonstrukce = X(1)/N;
p = 2*pi*(0:N-1)/N;

for k = 1:N/2
    a = X(k+1);    % komplexní amplituda
    phi = k*p;    % faze

    if k < N/2; s = 2; else s = 1; end

```



```

prost_frekw = s*(real(a)*cos(phi) -
imag(a)*sin(phi))/N; % rekonstrukce signalu %pomoci cos a sin

rekonstrukce = rekonstrukce + prost_frekw ; % rekonstrukce průběhu

if ismember(k,[1:3 10:15:55 160:60:N/2]) %vykreslení jednotlivých
%komponent a celého profilu
    subplot(2,1,1);
    plot(prost_frekw,'-.g');hold on
    title(['prostorové frekvence']);
    subplot(2,1,2);
    axis([1 length(x) mn mx]);
    plot(rekonstrukce),hold on,
    title('rekonstruovaný průběh / původní');
    pause;
end
end

```

A.3 Metoda nejmenších čtverců

Výpočet polohy středu m, n, o a poloměru koule r pomocí metody nejmenších čtverců:

```

[m,n]=size(A);
for i = 1:m
    x(i)=A(i,1);
    y(i)=A(i,2);
    z(i)=A(i,3);
end
for i=1:4
    e(i)=0;

```

```

    for j=1:4
        M(i,j)=0;
    end
end
for i=1:m
    M(1,1)=M(1,1)+x(i)*x(i);
    M(1,2)=M(1,2)+x(i)*y(i);
    M(1,3)=M(1,3)+x(i)*z(i);
    M(1,4)=M(1,4)+x(i);
    e(1)=e(1)-(x(i)*x(i)+y(i)*y(i)+z(i)*z(i))*x(i);
    M(2,1)=M(2,1)+x(i)*y(i);
    M(2,2)=M(2,2)+y(i)*y(i);
    M(2,3)=M(2,3)+z(i)*y(i);
    M(2,4)=M(2,4)+y(i);
    e(2)=e(2)-(x(i)*x(i)+y(i)*y(i)+z(i)*z(i))*y(i);
    M(3,1)=M(3,1)+x(i)*z(i);
    M(3,2)=M(3,2)+y(i)*z(i);
    M(3,3)=M(3,3)+z(i)*z(i);
    M(3,4)=M(3,4)+z(i);
    e(3)=e(3)-(x(i)*x(i)+y(i)*y(i)+z(i)*z(i))*z(i);
    M(4,1)=M(4,1)+x(i);
    M(4,2)=M(4,2)+y(i);
    M(4,3)=M(4,3)+z(i);
    M(4,4)=M(4,4)+1;
    e(4)=e(4)-(x(i)*x(i)+y(i)*y(i)+z(i)*z(i));
end
abc=e*inv(M);
m=-abc(1)/2
n=-abc(2)/2
o=-abc(3)/2

```

```

r=sqrt(m*m+n*n+o*o-abc(4))
B = A(:,1);
P = A(:,2);
[p,q]=size(B);

```

A.4 Výpočet úbytků objemu vlivem špatného nastavení sestavy

Chyby výpočtu objemu při posunu nebo rotaci projektované stopy na modelový předmět.

```
%CHYBA OBJEMU PRI POSUNU STOPY
```

```

r=5;
d = 28;
deltal=0.01:0.1:3;
deltad1 = d-(2*(sqrt(((power(d,2))/4)-power(deltal,2))));
deltad3 = power(d,3)-power((2*(sqrt(((power(d,2))/4)-
power(deltal,2))))),3);
deltad2 = power(d,2)-power((2*(sqrt(((power(d,2))/4)-
power(deltal,2))))),2);

```

```
%POLOKOULE
```

```
deltaV1 = (pi/12)*deltad3;
```

```
%VALEC
```

```
deltaV2 = (pi*r/6)*deltad2;
```

```
deltaV=deltaV1+deltaV2;
```

```
V = ((4/6*pi*power((d/2),3)))+(pi*r*(power((d/2),2))),
```

```
plot(deltal,deltaV);
```

```
pomer = (deltaV./V)*100;
```

```
%CHYBA OBJEMU PRI ROTACI
```

```
alpha = 1:0.1:30;
```

```

for i =1:length(alpha)
deltaV3(i) = ((4/6*pi*power(14,3)*(1-(power(cosd(alpha(i)),2)))))+
((pi*r*power(14,2)*(1-power(cosd(alpha(i)),2))));
end
plot(alpha,deltaV3)
pomer2 = (deltaV3./V)*100;
[AX H1 H2] = plotyy(alpha,deltaV3,alpha,pomer2,'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','objemový úbytek [mm^3]','Color','b')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','procentuální chyba v
ýpočtu [%]','Color','r')
set(H1,'Color','b')
set(H2,'Color','r')

```

A.5 Justování sestavy - střed rotace

Měření středu rotace sestavy pro určení směru osvitu měřeného objektu.

```

clear all, clc;exposure=80;
addpath('C:\Program Files\MATLAB\R2008b\work\Lumenera');
cameraNum =1;LucamCameraOpen(cameraNum);
[width, height] = LucamGetFrameSize(cameraNum);
xOffset = 0;yOffset=0;gain=1.5;
LucamSetExposure(exposure, cameraNum);alfa=10;
s1 = serial('COM1','BaudRate',57600,'DataBits',8);fopen (s1);
fprintf (s1,'1RS\r\n');
fprintf (s1,'2RS\r\n');pause (10);
fprintf (s1,'1OR\r\n');fprintf (s1,'2OR\r\n');clc
disp ('konfigurace řídicího portu čekejte');pause (20);
fprintf (s1,'2pr-50\r\n'),
pause(5)
increment = 90;

```

```

for k = 1:3
for j=1:4
move = ['1PR',num2str(increment),'\r\n']; %nastaveni kroku rotace
fprintf (s1,'1TP\r\n'); % zapis pro cteni pozice rotacniho motoru
tline = fgets(s1); %vycteni pozice
pause(1)
fprintf (s1,'2TP\r\n'); % zapis pro cteni pozice linearniho motoru
tline2 = fgets(s1); %vycteni pozice
ref1(k)= str2num(tline2(4:length(tline2))), % zjisteni pozice lin. motoru
ref= str2num(tline(4:length(tline))),%zjisteni pozice rotace
fprintf (s1,'1TS\r\n'); % zjisteni stavu ridici jednotky kvuli chybam
hls = fgets(s1);hls=hls(8:9);hls=str2num(hls); % analyza hlaseni
if isempty (hls)
    hls = 0
end
if hls <27
    disp('asi se seklo rizeni motoru , provadam restart cekej 200 sec')
    fprintf (s1,'1ST\r\n'); % stop pohybu
    fprintf (s1,'1RS\r\n');pause (10); % reset motoru
    fprintf (s1,'1OR\r\n'); % zahoumovani
    pause (40);
    move1 = ['1PA',num2str(ref),' \r\n']; % vytvoreni navratoveho bodu
    fprintf (s1,move1);pause(40); %navrat na puvodni pozici
end
    pause(5);
exposure=40;clc;
disp ('probíhá měření');
[a] = LucamTakeQuickSnapshot(width, height, xOffset, yOffset,
exposure, gain, cameraNum);
a=double(a);

```

```

a=a(:,:,3);b=find (a<60);a(b)=0;b=find (a>60);
size(b);xm=0;ym=0;m=0; % nacteni snimku
for i=1:ans(1,1)
sloup=(fix(b(i,1)/1024));
    rad=(mod(b(i,1),1024));
    m=(m+a(rad,sloup));
    xm=(xm+(a(rad,sloup)*rad));
    ym=(ym+(a(rad,sloup)*sloup)); % vypocet teziste
end
xt(k,j)=xm/m;yt(k,j)=ym/m; % vypocitani bodu teziste
close all
figure
imagesc(a), axis equal,hold on % vykresleni stredu a obrazku
plot(yt(k,:),xt(k,:),'xr'),
fprintf (s1,move);pause(10); % posun na dalsi pozici
end
xct(k)=sum(xt(k,:))/4,
yct(k)=sum(yt(k,:))/4, % vypocet stredu pomoci 4 merenych bodu
close all
figure
imagesc(a), axis equal,hold on
plot(yt,xt,'xy',yct(k),xct(k),'xr'), % vykresleni stredu
%a jednotlivych merenych bodu
fprintf (s1,'2pr15\r\n'),pause(5); % posun ke zdroji svetla
end
fclose(s1);
LucamCameraclose(cameraNum);

```

A.6 Vyhodnocení Ronchi testu

Program pro vyhodnocení digitálního Ronchi testu.

```
%% nalezeni pruniku dvou ronchi gramu krok 50 pixelů, LU 125M

clear all
f=35; % ohnisko objektivu,
ds = 3032; % ohnisková vzdálenost (vzdálenost svet zdroje od povrchu)
mri_kon_prj = 0.01738; % mrizkova konstanta projektoru
dr=2974; % vzdalenost projektoru od povrchu zrcadla
cd('c:\Users\mandat\Dropbox\Ronchi\11');
a=double(imread('hor.bmp'));load('ronchi_sour');
b=double(imread('vod.bmp'));
c=a+b;
c(find(c<60))=0;vel_pixelu = 0.0067;
imagesc(c); figure(gcf),colormap (gray)
hold on, plot(vzdalx_pix,vzdaly_pix,'xr')
vzdalx = (vzdalx_pix-99)*vel_pixelu*2;
vzdaly = (vzdaly_pix-69)*vel_pixelu*2;
vzdal_mrizz = (vzdal_mrizz_poz-1)*mri_kon_prj*50;
vzdal_mrivy = (vzdal_mrivy_poz-1)*mri_kon_prj*50;
% for i = 1:6;
%     for j=1:7
%     rozdil_x(i,j+1)=vzdalx(i,j+1)-vzdalx(i,j);
%     end
%     rozdil_x(i,1)=0;
% end

%% vypočítání normál
[k,l]=size(vzdalx)
```

```

for i = 1: k
    for j = 1:l
        Nx(i,j) = (((vzdalx(i,j)/(2*f)))*(1+(dr/ds)))
        -(vzdal_mrizz(i,j)/(2*ds));
        Ny(i,j) = (((vzdaly(i,j)/(2*f)))*(1+(dr/ds)))
        -(vzdal_mrizy(i,j)/(2*ds));

    end

end

%% souradnice
for i=1:k
    for j=1:(l)
        alpha1 = atan(vzdal_mrizz(i,j)/(ds-dr));
        alpha2 = atan(vzdal_mrizy(i,j)/(ds-dr));
        xx(i,j)=(vzdal_mrizz(i,j)*dr*cos(alpha1))/(ds-dr);
        yy(i,j)=(vzdal_mrizy(i,j)*dr*cos(alpha2))/(ds-dr);
        xs(i,j)=vzdal_mrizz(i,j)-(dr/f*vzdalx(i,j));
        ys(i,j)=vzdal_mrizy(i,j)-(dr/f*vzdaly(i,j));

    end

end

%% rekonstrukce povrchu
for i=1:k
    for j=1:(l-1)

        deltah(i,j+1)=(0.5*(((Nx(i,j)+Nx(i,j+1))/2))*abs(xs(i,j)-xs(i,j+1)))
        + (0.5*(((Ny(i,j)+Ny(i,j+1))/2))*abs(ys(i,j)-ys(i,j+1)))

    end
end

```



```

end
for i=2:k
    deltah(i,1)=(0.5*(((Nx(i-1,1)+Nx(i,1))/2))*abs(xs(i-1,1)-xs(i,1)))
    + (0.5*(((Ny(i-1,1)+Ny(i,1))/2))*abs(ys(i-1,1)-ys(i,1)));
end
z(1,1)=0
for i=2:k
    z(i,1)=z(i-1,1)+deltah(i,1);
end
for i=1:k
    for j=1:(l-1)

        z(i,j+1)=z(i,j)+deltah(i,j+1)
    end
end
zz=z;
[m,n,o,r]=mnc(xs,ys,zz);

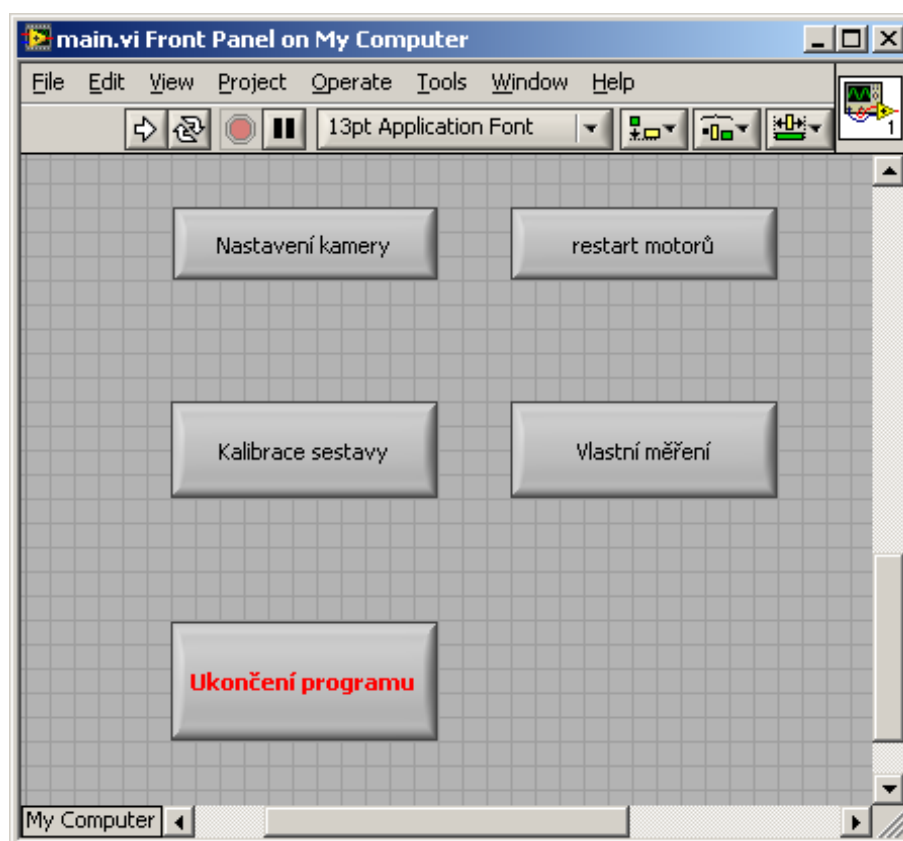
```

Příloha B

Programy v LabView

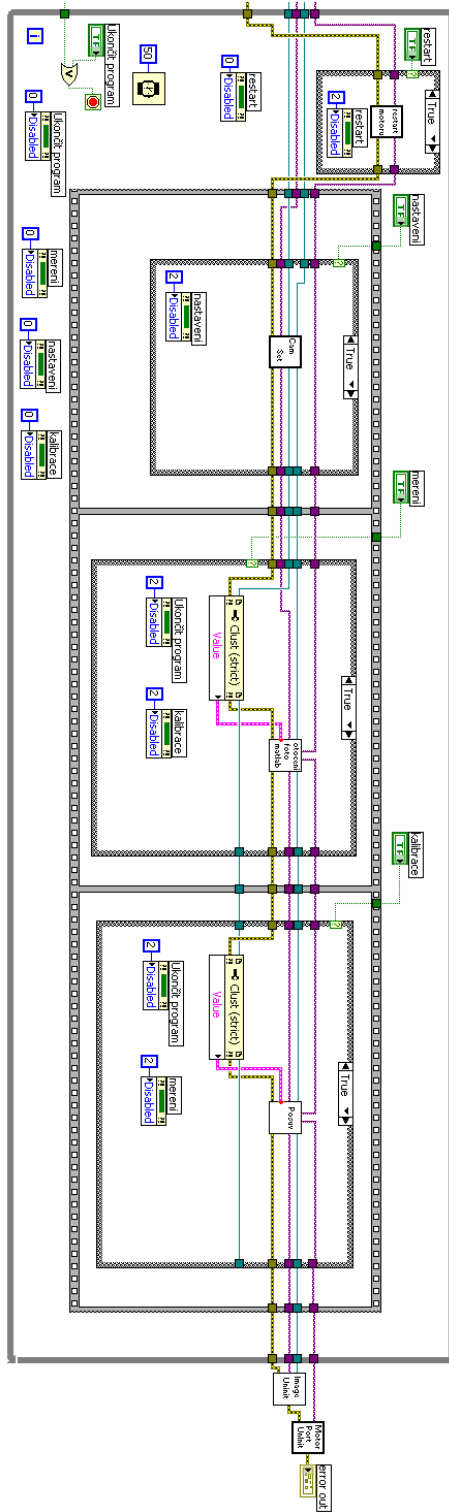
B.1 Ovládání měřicího procesu

Okno hlavního programu pro ovládání a kalibraci sestavy je na obrázku B.1. Programový

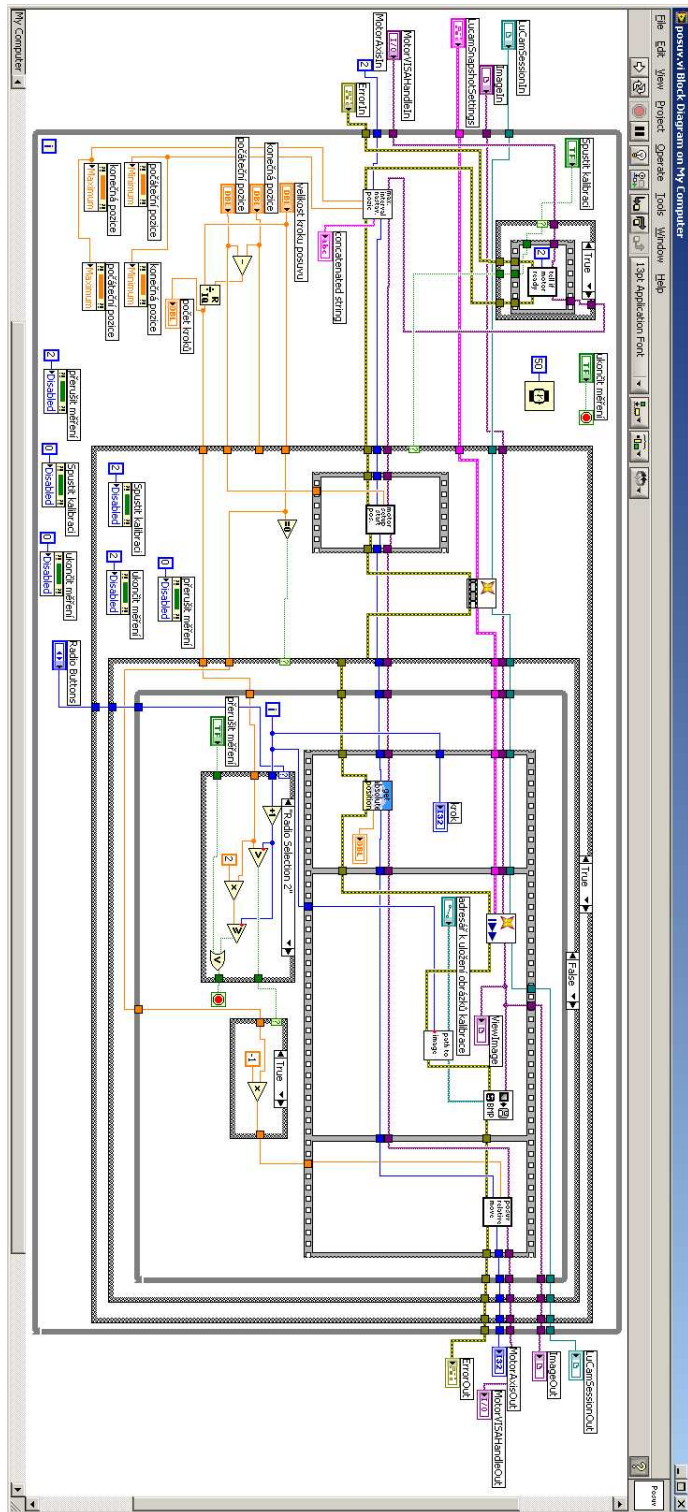


Obrázek B.1: Hlavní okno software pro ovládání měření a kalibrace.

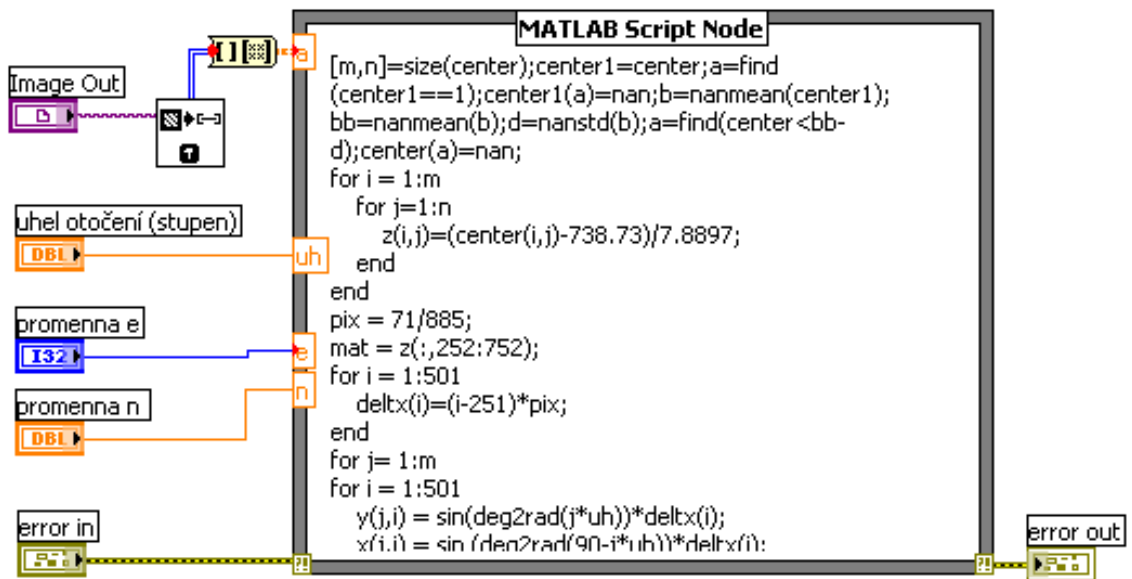
kód v LabView je reprezentován blokovým schématem, kde jednotlivé bloky a podbloky jsou již předdefinované a je možno je modifikovat, konfigurovat nebo doplňovat. Pro účely kalibrace a posunu měřeného předmětu v ose z slouží blokové schéma na brázcích B.2 - B.4. Interface Matlabu do LabView a využití skriptů vytvořených v programu Matlab je na obrázku B.5. Příklad ukládání a načítání nastavení celé sestavy je uveden na obrázku B.6.



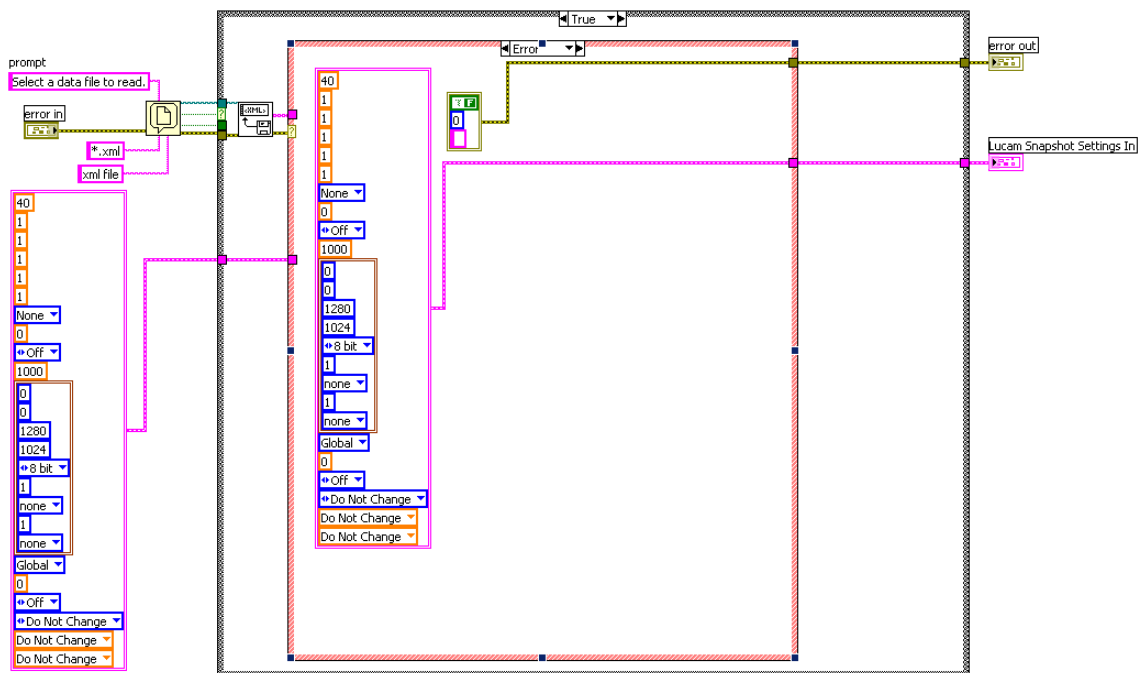
Obrázek B.2: Blokové schéma hlavního programu odpovídající obrázku B.1.



Obrázek B.4: Posun v ose z.



Obrázek B.5: Interface pro zpracování obrazu pomocí Matlabu.



Obrázek B.6: Uložení a načtení nastavení měřicí sestavy.

Příloha C

Experimentální vybavení

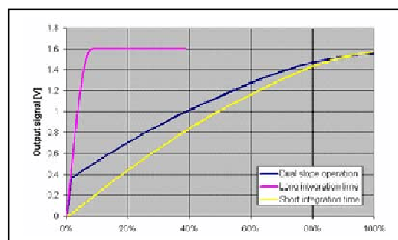
C.1 Kamera Lumenera

Při reálných experimentech byla využita kamera Lumenera série LU120 v provedení LU120bw. Na obrázcích C.1 a C.2 jsou uvedeny technické parametry použité kamery.

Specifications

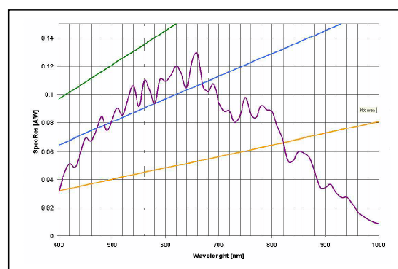
Lu120

Image Sensor	2/3" format, color or mono, 8.6mm x 6.9mm array
Effective Pixels	1280 x 1024, 6.7μm square pixels
Frame Rate	15 fps at 1280x1024, 60fps at 640x480
Sensitivity	Moderate
Dynamic Range	56dB Rolling Shutter 52dB Global Shutter ~100dB in multi-slope integration mode
White Balance	Auto / Manual
Dimensions (W x H x D)	2.00 x 2.50 x 1.63 inches (board level) 2.25 x 3.85 x 1.56 inches (enclosed)
Mass	~150g / 300g with enclosure
Power Requirement	USB bus power, or external 6VDC, 500mA
Power Consumption	~2.5 Watts
Operating Temperature	0°C to +50°C
Operating Humidity	5% - 95%, Non-condensing
Interface Connector	Standard USB
Lens Mount (Lens not included)	C-Mount (CS-Mount option)



Dual Slope Integration Mode

On chip method of extending the dynamic range by integrating a long and short frame exposure into one still image. Short-integration controls overexposure of bright conditions, while long-integration supports exposure of low-light conditions. The resulting electro-optic curve is shown in the graph here.



Monochrome Response

Ordering Information

Lu120M	– Monochrome Camera Module
Lu120C	– Color Camera Module (Jan/04)
Lu125M	– Enclosed Monochrome Camera
Lu125C	– Color Camera Module (Jan/04)
LuSDK	– Software Developer's Kit

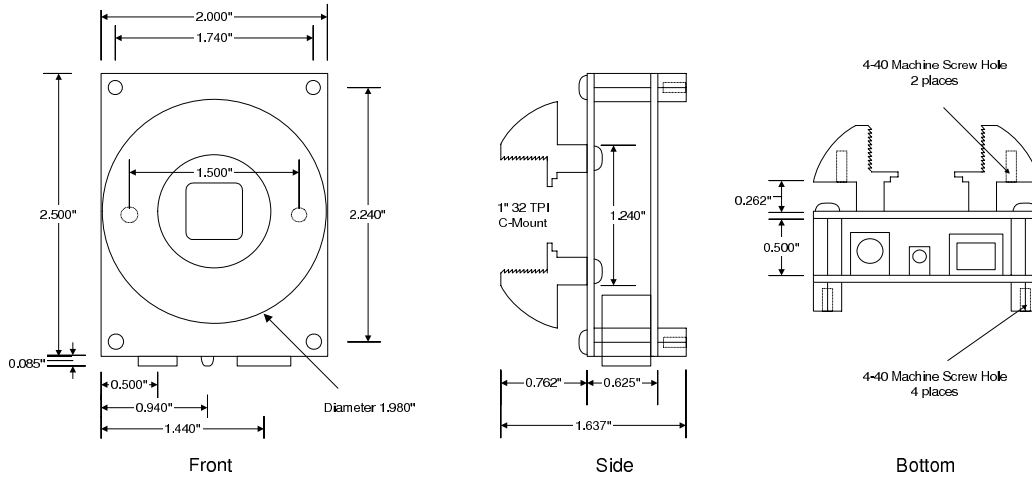
©2005 Lumenera Corporation, all rights reserved.
Design, features, and specifications are subject to change without notice.
January 2005

Obrázek C.1: Parametry použité kamery Lumenera LU120 (www.framos.de).

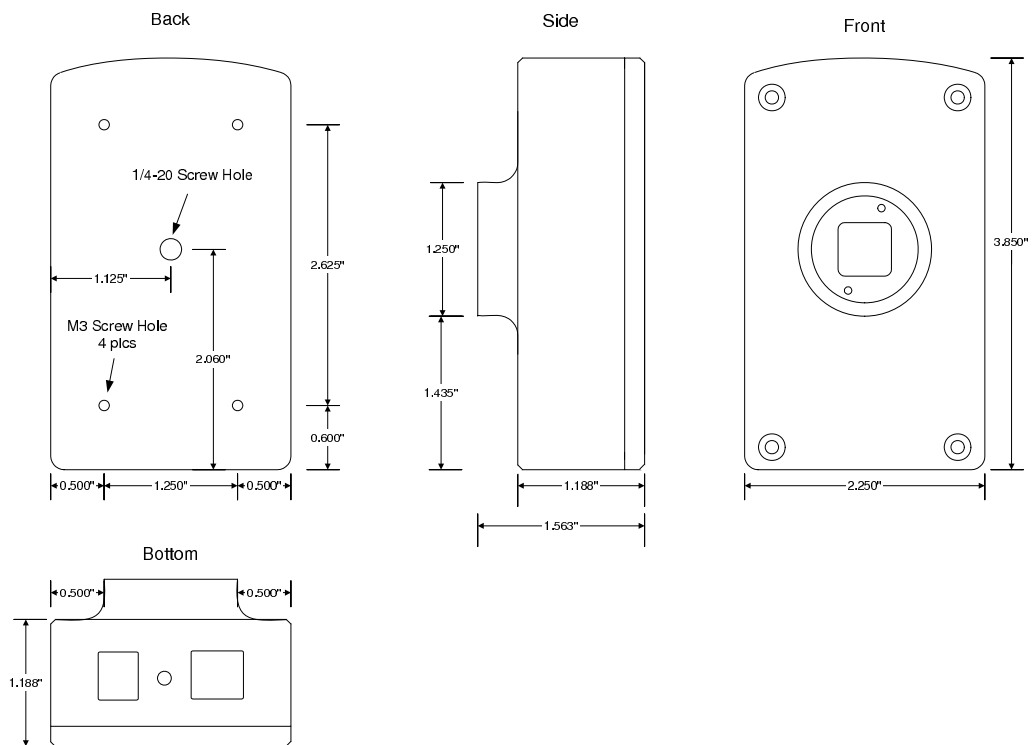
Mechanicals

Lu120

OEM Board-Level Camera



Enclosed Camera

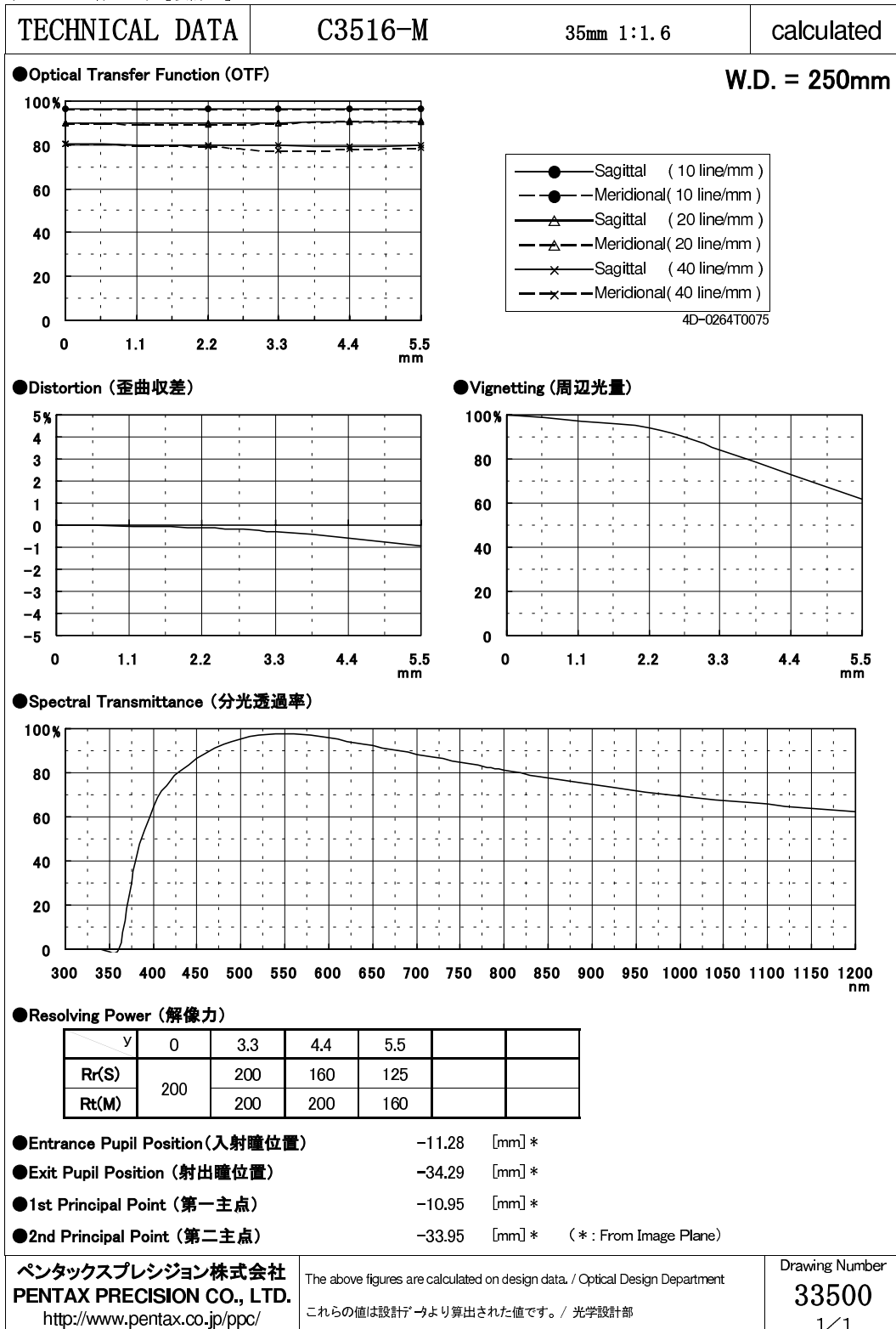


©2005 Lumenera Corporation, all rights reserved.
Design, features, and specifications are subject to change without notice.
January 2005

Obrázek C.2: Parametry použité kamery Lumenera LU120 (www.framos.de).

C.2 Požité objektivy

Na obrázku C.3 jsou parametry použitého objektivu v experimentu.



Obrázek C.3: Parametry použitého objektivu (www.pentax.co.jp/ppc/).