

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PARAMETRŮ AXIÁLNÍCH LOŽISEK 2D TRIANGULAČNÍ TECHNIKOU

MEASUREMENT OF AXIAL BEARING PARAMETERS BY 2D TRIANGULATION TECHNIQUE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ján Schrötter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ilona Janáková, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Ján Schrötter

ID: 161914

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů axiálních ložisek 2D triangulační technikou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout vizuální systém pro měření parametrů kroužků axiálních ložisek. Předpokládá se využití 2D triangulační techniky – nasvětlení liniovým laserem a současné snímání plošnou kamerou.

1. Seznamte se s danou úlohou.
2. Proveďte průzkum trhu komerčních 2D skenerů a zapůjčený skener/y otestujte.
3. Navrhněte vhodné uspořádání mechanicko-optických prvků systému. Vyberte, případně navrhněte a sestavte, vhodné komponenty (kamera, objektiv, osvětlení, fixační prvky).
4. Pořídte testovací galerii snímků ložisek.
5. Navrhněte algoritmy pro detekci osvětleného pruhu a určení potřebných parametrů.
6. Oveřte návrh systému pro potlačení vlivu konzervačního oleje použitím dvou kamer.
7. Navrhněte vhodné řešení kalibrace systému.
8. Vše otestujte, stanovte omezující podmínky, zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVÁČ, V., ŠONKA, M.: Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992, ISBN 80-85424-67-3.

JOSEP FOREST COLLASO. New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners. Girona: Universitat de Girona, 2004. ISBN 9788468930916.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 14.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Ilona Janáková, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom systému na meranie parametrov axiálnych ložísk za využitia aktívnej optickej 2D triangulácie. Navrhnutý systém je schopný kompenzovať chybu merania spôsobenú lomom svetla na vrstve konzervačného oleja, ktorým sú ložiská pokryté.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

triangulácia, meranie profilu, 2D skener, lom

ABSTRACT

The goal of this diploma thesis is to design a system for axial bearings parameter measurement. The system uses principles of 2D active optical triangulation. The system will have a capability of compensating error caused by refraction on preservative oil layer, which the bearings are covered in.

KEYWORDS

triangulation, profile measurement, 2D scanner, refraction

SCHRÖTTER, Ján. *Měření parametrů axiálních ložisek 2D triangulační technikou*. Brno, 2018, 73 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedúci práce: Ing. Ilona Janáková, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Měření parametrů axiálních ložisek 2D triangulační technikou“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor(ka) uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý(-á) následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcej diplomovej práce pani Ing. Iloně Janákové, Ph.D., za odborné vedenie, konzultácie, pevné nervy a cenné rady k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	11
1 Problematika zámeny ložísk	12
1.1 Súčasný stav	12
1.2 Požadované riešenie	13
2 Metódy merania parametrov ložísk	14
2.1 Možnosti predchádzania zámenám	14
2.2 Optická triangulácia	14
2.2.1 Aktívna triangulácia	14
2.2.2 2D triangulácia	15
2.2.3 Problém optickej triangulácie	16
3 Možnosť využitia komerčných snímačov	18
3.1 Profilometer scanCONTROL 2710-50	18
3.1.1 Princíp činnosti a špecifikácia	18
3.1.2 Výsledky merania	18
3.2 Profilometer scanCONTROL 2900-25/BL	20
3.2.1 Princíp činnosti a špecifikácia	20
3.2.2 Výsledky merania	20
3.3 Výškomer Baumer	25
3.3.1 Princíp činnosti a špecifikácia	25
3.3.2 Výsledky merania	25
4 Vlastný návrh profilometra	27
4.1 Požiadavky na systém	27
4.2 Usporiadanie systému	28
4.3 Kompenzácia nepresnosti merania	32
4.4 Snímacia sústava	33
4.4.1 Kamera	34
4.4.2 Objektív	36
4.4.3 Parametre a obmedzenia snímačovej sústavy	37
4.5 Kalibrácia systému	39
4.6 Transformačná matica	40
4.7 Návrh kalibračnej metódy	41
4.7.1 Návrh kalibračného predmetu	46
4.8 Detekcia laserovej čiary	46
4.8.1 Konvolúcia	47

4.8.2	Maximum paraboly	49
4.9	Určenie konštánt K_1 a K_2	52
4.10	Meranie parametrov	54
4.10.1	Meranie šírky ložiska	54
4.10.2	Meranie dĺžky profilu	54
4.10.3	Meranie polomeru obežnej dráhy	55
4.10.4	Meranie hĺbky obežnej dráhy	56
4.10.5	Meranie vonkajšieho priemeru	57
4.10.6	Softvérové riešenie	58
4.10.7	Vyhodnotenie meraní	60
5	Záver	66
	Literatúra	68
	Zoznam príloh	69
A	Parametre ložísk	70

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Parametre ložísk [1]	12
2.1	Triangulačný trojuholník [3]	15
2.2	Princíp 2D triangulácie	16
2.3	Lom svetla v olejovej vrstve [1]	17
3.1	Princíp merania laserovým profilometrom micro-epsilon [4]	19
3.2	3D scan pomocou profilometru scanCONTROL	19
3.3	X-Z rez pre čistý krúžok	20
3.4	X-Z rez pre krúžok pokrytý olejom	20
3.5	Výstup merania pomocou nástroja scanCONTROL Configuration Tools	21
3.6	Snímok z čipu pri expozícii 10 ms	23
3.7	Snímok z čipu pri expozícii 20 ms	23
3.8	Detail snímaného profilu pri expozícii 10 ms	23
3.9	Detail snímaného profilu pri expozícii 20 ms	23
3.10	Laserový výškomer PosCon HM	25
4.1	Usadenie ložiska do zarážok	28
4.2	Schéma vnorenia ložiska medzi zarážky	29
4.3	Trojuholník tvorený zarážkami a ložiskom	29
4.4	Usporiadanie meracieho systému	31
4.5	Meracie pracovisko	31
4.6	Chyba pri snímaní dvomi kamerami	32
4.7	Kamera Imaging Source DFK 41BU02[7]	34
4.8	Spektrálna charakteristika použitého filtra	35
4.9	RGB snímka s filtrom	36
4.10	Červený kanál pôvodnej snímky	36
4.11	Objektív VICO imaging MFA1-230-5M35[8]	37
4.12	Rozdiel zobrazenia scény pomocou endocentrického a telecentrického objektívu[9]	39
4.13	Výber kalibračných bodov	42
4.14	Chyby kalibrácie, kamera 1	44
4.15	Chyby kalibrácie, kamera 2	44
4.16	Veľkosť chýb jednotlivých kalibračných bodov	45
4.17	Profil kalibračného predmetu	46
4.18	Hodnoty pixelov v stĺpci	48

4.19	Detail plochého vrcholu	48
4.20	Invertovaná druhá derivácia normálneho rozloženia	48
4.21	Odozva na konvolúciu	49
4.22	Detail odozvy	49
4.23	Maximum na parabole	50
4.24	Detekcia laseru s invertovanou druhou deriváciou Gaussovej krivky ako jadrom konvolúcie	51
4.25	Detekcia laseru s Gaussovou krivkou ako jadrom konvolúcie	51
4.26	Závislosť K_1 na súradnici z	52
4.27	Závislosť K_2 na súradnici z	52
4.28	Závislosť K_1 na súradnici x	52
4.29	Závislosť K_2 na súradnici x	52
4.30	Závislosť K_1 na vrstve oleja	53
4.31	Závislosť K_2 na vrstve oleja	53
4.32	Závislosť skreslenia z pohľadu kamery 1 na vrstve oleja	53
4.33	Závislosť skreslenia z pohľadu kamery 2 na vrstve oleja	53
4.34	Profil a podložka preložené priamkami	54
4.35	Dĺžka profilu, vzdialenosť medzi prvým a posledným bodom profilu	55
4.36	Body patriace obežnej dráhe preložené kružnicou	56
4.37	Hĺbka obežnej dráhy	57
4.38	Prvý bod patriaci meranému profilu	57
4.39	Kompenzácia oleja v oblasti obežnej dráhy	59
4.40	Kompenzácia oleja meraním s dvomi kamerami. Modré body - kamera 1, červené - kamera 2, zelené - kompenzované	60

ZOZNAM TABULIEK

3.1	Meranie na 51205 SKF	22
3.2	Meranie na 51115 SKF	22
3.3	Meranie na 51113 ZKL	22
3.4	Opakovateľnosť, 51113 FAG priechodzí	24
3.5	Opakovateľnosť, 51113 ZKL priechodzí	24
3.6	Opakovateľnosť, 51113 ZKL hriadeľový	24
3.7	Meranie na 51102A ZKL	26
3.8	Meranie na 51113 FAG	26
4.1	Príklady zanorenia y pre rôzne priemery	30
4.2	Rozlíšenie sústavy	38
4.3	Zoznam kalibračných bodov	43
4.4	Porovnanie meraní s našim meracím systémom a profilometrom scan- CONTROL	61
4.5	Chyby merania	61
4.6	Meranie bez oleja	62
4.7	Meranie s olejom, prístup 1	62
4.8	Chyby merania, prístup 1	63
4.9	Meranie s olejom, prístup 2	64
4.10	Chyby merania, prístup 2	64

ÚVOD

Úloha, ktorej sa venuje táto práca, pochádza z priemyselnej praxe a venuje sa návrhu systému pre meranie parametrov axiálnych ložísk.

Dôvod, prečo sa táto úloha musí riešiť je ten, že v závode kde sa tieto ložiská vyrábajú dochádza k občasným zámenám rôznych typov ložísk, čo má následok v reklamáciách od zákazníkov.

Meranie bude vychádzať z metód optickej triangulácie. Jedna zo sťažujúcich podmienok, ktoré bude musieť systém riešiť, je vrstva konzervačného oleja, ktorým sú merané ložiská pokryté. Vplyvom oleja dochádza k lomu svetla a tým pádom sa meranie zafažuje chybou vzniknutou práve kvôli lomu svetla.

Úvod práce sa venuje popisu aktuálneho stavu vo výrobe ložísk a problémom spojených so samotnými zámenami. Taktiež sú naznačené výstupy, ktoré by mal výsledný systém dosiahnuť. Rozobraté sú prístupy ktoré by mohli prispieť k obmedzeniu zámen, pričom dôraz je kladený práve na metódy optickej triangulácie.

Ďalšia kapitola skúma možnosť použitia priemyselných snímačov na riešenie tejto úlohy. Postupne budú predstavené tri snímače, ktoré boli na ústave k dispozícii, a zhodnotené budú dosiahnuté výsledky s nimi.

Samotný návrh vlastného profilometra je štrukturovaný do niekoľkých podkapitol. Definované budú požiadavky na systém, mechanické usporiadanie systému a popis snímacej sústavy. Dôležité budú kapitoly venujúce sa kompenzácii nepresnosti merania a rovnako aj kapitola s návrhom kalibračného procesu pre celý merací systém. Navrhnutý bude taktiež algoritmus na detekciu laserovej čiary, ktorej správna a presná detekcia je nevyhnutná ku presnému meraniu.

V poslednej časti práce je rozobraný spôsob merania jednotlivých parametrov, softvérové riešenie a taktiež vyhodnotenie uskutočnených meraní.

1 PROBLEMATIKA ZÁMENY LOŽÍSK

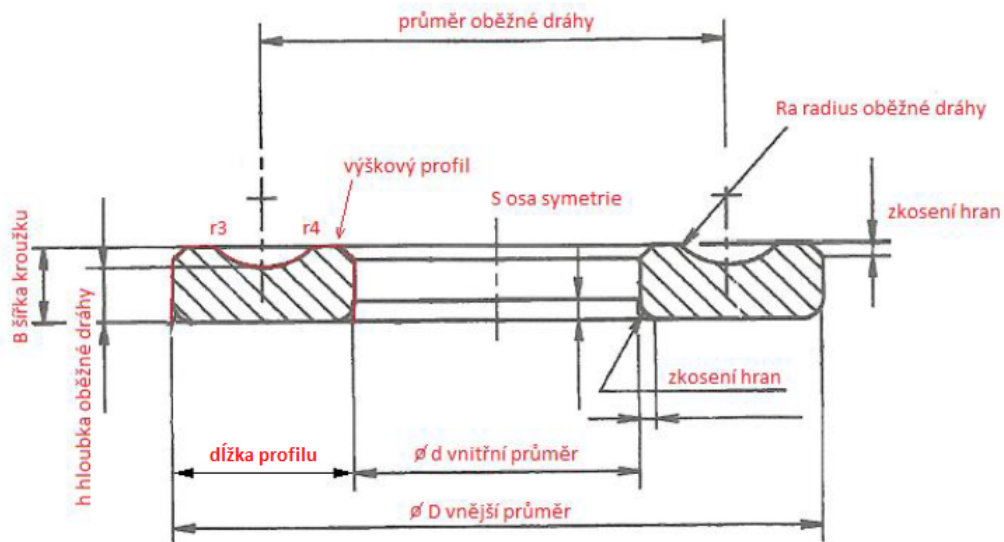
Táto časť práce slúži ako úvod k problematike merania parametrov axiálnych ložísk a zhŕňa očakávané výstupy systému.

1.1 Súčasný stav

Firma ZKL Klášterec, a.s. v súčasnej dobe vyrába sortiment axiálnych ložísk v rozsahu:

- D od 24 do 200 mm
- d od 10 do 170 mm
- B od 2,2 do 30 mm

Celý sortiment je vyrábaný v troch aplikáciách: ZKL, FAG, SKF. Jednotlivé parametre sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 1.1: Parametre ložísk [1]

Pri montáži často dochádzalo k pomiešaniu dielov, čo viedlo k reklamáciám zo strany zákazníkov. Firma preto hľadala spôsob, ako tomuto zabrániť.

Na trhu nenašli zariadenie, ktoré by svojim rozsahom a rozlišovacou schopnosťou dokázalo bezpečne odlišiť jednotlivé aplikácie. Ako náhradný spôsob bolo použité vytvorenie "linky" z pracovníkov montáže, kde jeden krok operácie robí len jeden pracovník a zodpovedá za jeho správne vyhotovenie. Zároveň bola zaradená operácia váženia ložiska.

Týmto sa dosiahlo významného zlepšenia stavu. Aj napriek tomu však stále v malej miere dochádza k dostaniu sa nesprávne zloženého ložiska ku zákazníkovi. Dôvodom je zlyhanie ľudského faktoru, a zároveň nepresnosť metódy merania váhy.

1.2 Požadované riešenie

Navrhnuť a skonštruovať zariadenie, ktoré bude schopné odlišiť jednotlivé aplikácie zmeraním základných parametrov, ktorými sa tieto aplikácie odlišujú. Týmito parametrami sú:

- šírka krúžku - B
- hĺbka dráhy - h
- rádius dráhy - R_a
- dĺžka profilu

Monitorovacie zariadenie zaradiť do aktuálneho technologického toku ako kontrolnú metódu s cieľom zaistiť nulovú priepustnosť vadne zložených ložísk zákazníkovi. Požadovaný výkon zariadenia je takt cca 20 ložísk za minútu. [2]

2 METÓDY MERANIA PARAMETROV LOŽÍSK

Nasledujúca kapitola vychádza z technickej správy pracovníkov UAMT FEKT v Brne [1]. V kapitole sú rozobraté niektoré možnosti merania parametrov ložísk, ktoré by bolo možné použiť a zároveň sú niektoré princípy aj prakticky vyskúšané. Pozornosť je venovaná hlavne optickým metódam merania.

2.1 Možnosti predchádzania zámenám

Z technickej dokumentácie a z popisu výroby a montáže axiálnych ložísk sa naskytujú možnosti riešenia problému zámeny jednotlivých častí ložísk - zámena priechodzieho a hriadelového krúžku, zámena prevedenia alebo zámena jednotlivých veľkostí - pomocou týchto variánt:

1. meranie parametrov ložísk
 - jedného charakteristického parametru
 - súčasné meranie viac parametrov alebo profilu krúžku ložiska
 - vhodná kombinácia viacerých meraní
2. využitie označenia jednotlivých krúžkov kódom a kontrola pomocou čítačky kódu
3. automatizácia výroby k vylúčeniu zámeny

V tomto texte sa budem ďalej venovať prvej variante, a to konkrétne optickej triangulácii. Ostatné varianty je možné si dohľadať v už spomenutej technickej správe. [1]

2.2 Optická triangulácia

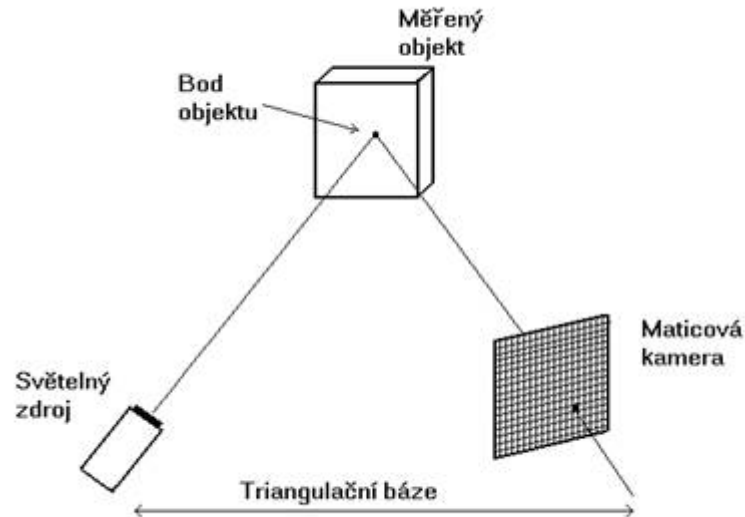
Optická triangulácia je jedna z najčastejšie využívaných optických metód 3D merania. Medzi triangulačné techniky okrem iných patrí napríklad stereovidenie, fokusovacie techniky, meranie s teodolitom, atď. Pre túto aplikáciu je však najideálnejšie použitie aktívnej triangulácie.

2.2.1 Aktívna triangulácia

Aktívna triangulácia spočíva vo fotogrammetrickej rekonštrukcii snímaného objektu nasvetením jeho povrchu a súčasným snímaním CCD/CMOS snímačom.

Zdroj svetla spolu so snímačom a osvetleným bodom na skúmanom objekte tvorí tzv. triangulačný trojuholník. Spojnicu svetelný zdroj - snímač nazývame triangulačná báza. Na strane zdroja je uhol zvieraný s triangulačnou bázou nemenný, kdežto

na strane snímača je uhol určený premennou pozíciou vysvieteného bodu CCD snímača. Z veľkosti tohto uhlu a na základe znalosti triangulačnej báze je možné určiť Z-ovú súradnicu objektu. Princíp je zobrazený na nasledovnom obrázku.



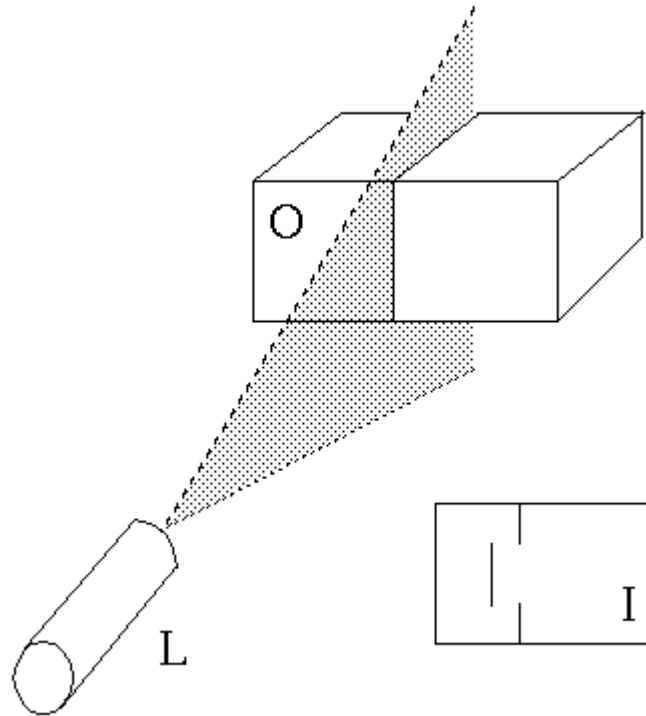
Obr. 2.1: Triangulačný trojuholník [3]

Ku označeniu skúmaného predmetu je možné použiť rôzne svetelné vzory. Najjednoduchšia metóda je označenie predmetu svetelným bodom - 1D triangulácia. Ak predmet označíme svetelným pruhom, ide o 2D trianguláciu. Ak použijeme štruktúrovaný zväzok, jedná sa o 3D trianguláciu.

Jednou z nevýhod metód aktívnej triangulácie je to, že premietaný vzor musí byť z pohľadu kamery viditeľný. Miesta, na ktoré nie sú osvetlené laserom nie sme schopní určiť a údaj o Z-ovej súradnici nám teda chýba. [3]

2.2.2 2D triangulácia

V prípade použitia svetelného pruhu a maticového snímacieho čipu hovoríme o 2D triangulácii. Najčastejšie zostavenie snímačej sústavy je také, keď na snímaný predmet kolmo svieti zdroj svetelného pruhu (značkovací laser) a kamera sa na scénu pozerá pod uhlom. Z takto získaných dát môžeme vypočítať priestorové súradnice každého nasvieteného bodu, ktorý sa premietne na snímací čip. Situáciu ilustruje nasledovný obrázok.

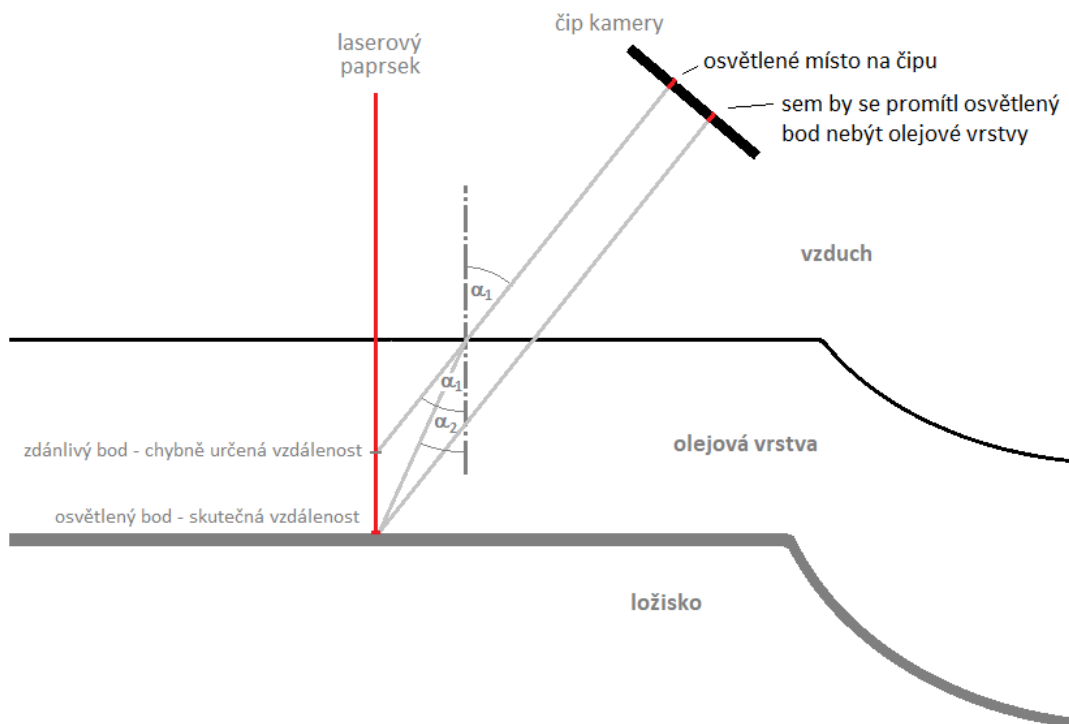


Obr. 2.2: Princíp 2D triangulácie

Z bodov získaných snímaním predmetu a paprsku laseru získame dve súradnice premietnutého bodu (pixely na snímači). Tieto body je však potrebné previesť na skutočnú polohu v priestore. Prevod je možno uskutočniť dvoma spôsobmi - čisto matematicky pomocou priameho výpočtu, alebo je možné pred snímaním systém skalibrovať. Tomuto sa venuje kapitola 4.5.

2.2.3 Problém optickej triangulácie

Pri meraní ložísk metódou optickej triangulácie budeme narážať na jeden problémový faktor - týmto faktorom je znečistenie ložiskových krúžkov vrstvou konzervačného oleja. Predpokladá sa, že k meraniu by dochádzalo až po konzervácii, pretože manipulácie s krúžkami pred konzerváciou a pravdepodobne aj samotná konzervácia sú kritické miesta, kde najčastejšie dochádza k zámene krúžkov. Tento problém sa bude vyskytovať pri každej metóde merania, ktorá je založená na optickej triangulácii - dochádza totiž k lomu laserového paprsku na olejovej vrstve a tým následne ku skresleniu výsledku merania. Pre názornosť je problém ilustrovaný na obrázku. Navyše je pre jednoduchosť uvažovaný kolmý dopad laserového paprsku - nedochádza k dvojitému lomu.



Obr. 2.3: Lom světla v olejové vrstvě [1]

3 MOŽNOSŤ VYUŽITIA KOMERČNÝCH SNÍMAČOV

V priebehu práce na diplomovej práci sa naskytla možnosť vyskúšať meranie s niekoľkými komerčnými priemyselnými snímačmi - konkrétne dva profilometre a jeden výškometer. Cieľom bolo hlavne zistenie vplyvu vrstvy konzervačného oleja na výsledok merania. Dosiahnuté výsledky sú zhrnuté v nasledujúcich sekciách.

3.1 Profilometer scanCONTROL 2710-50

3.1.1 Princíp činnosti a špecifikácia

Prvá metóda merania ktorú sme spolu s vedúcou práce vyskúšali, bolo naskenovanie ložiskových krúžkov pomocou profilometru od firmy micro-epsilon scanCONTROL 2710-50. Tento prístroj funguje na princípe optickej triangulácie. Tejto metóde sa venovala predchádzajúca kapitola. Zhrniem len základné charakteristiky tohto princípu:

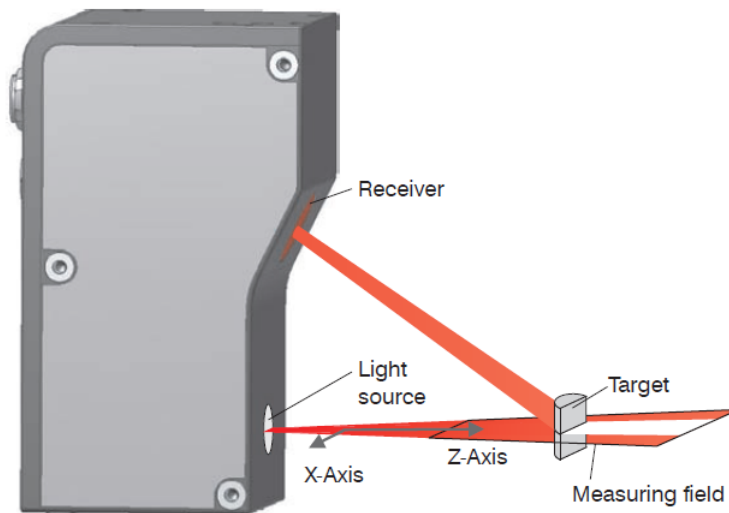
- laserová čiara je premietaná na cieľový predmet, ktorého priestorové vlastnosti chceme merať
- rozptýlené odrazené svetlo sa premieta na maticový optický senzor

Triangulácia pomocou laserovej čiary (2D triangulácia) je v princípe rovnaká ako jednoduchá 1D triangulácia pomocou laserového bodu. Platí tu rovnaký princíp aký bol popísaný v kapitole 2.2.2. Okrem vzdialenostnej informácie (osa Z), tak získavame aj presnú informáciu o každom bode na laserovej čiare (osa X). Keď navyše opakujeme merania s tým, že pri každom meraní pridáme dostatočne jemný translačný pohyb v ose Y (pohyb snímačom alebo pohyb snímaným telesom), sme navyše schopný získať aj informáciu v ose Y a máme tak kompletnú 3D informáciu o snímanom predmete. Základný princíp merania týmto snímačom je ilustrovaný na obrázku 3.1

Výrobca udáva referenčné rozlíšenie $15 \mu\text{m}$ a linearitu $\pm 0,2\%$ FSO (Full Scale Output). Pri štandardnom režime je minimálna vzdialenosť na snímanie 350 mm od snímača, maximálna je 450 mm. Tomu zodpovedá rozsah v osi X 88 mm až 112 mm a rozlíšenie 640 bodov na jeden zosnímaný profil. Viac detailov k technickej špecifikácii sa dá dohľadať v [4].

3.1.2 Výsledky merania

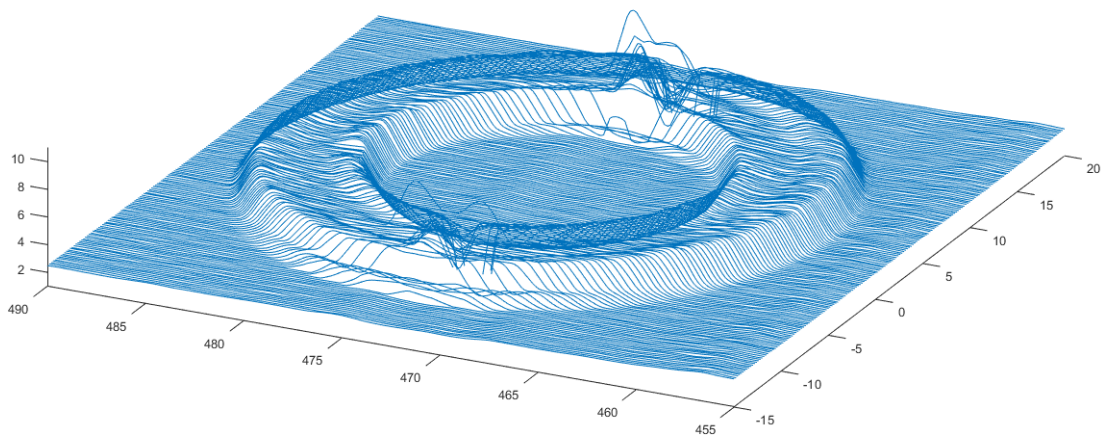
Pri meraní bola použitá varianta, kedy sa ponad snímaný krúžok robil translačný pohyb, a tým sme získali okrem súradníc v osiach X a Z aj záber ponad celý krúžok.



Obr. 3.1: Princíp merania laserovým profilometrom micro-epsilon [4]

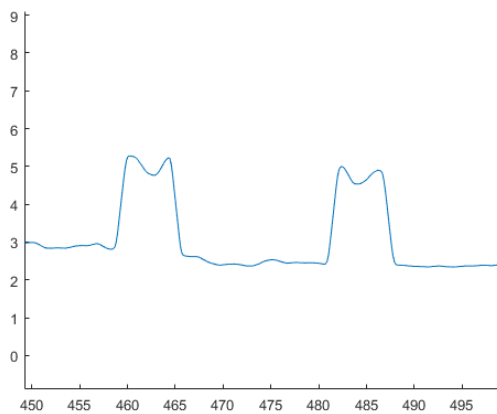
Merania boli uskutočnené pre krúžky prevedenia ZKL a FAG s priemerom 28 mm a 90 mm.

Scan celého krúžku spracovaný a zobrazený v Matlabe môže vyzeráť ako na obrázku 3.2

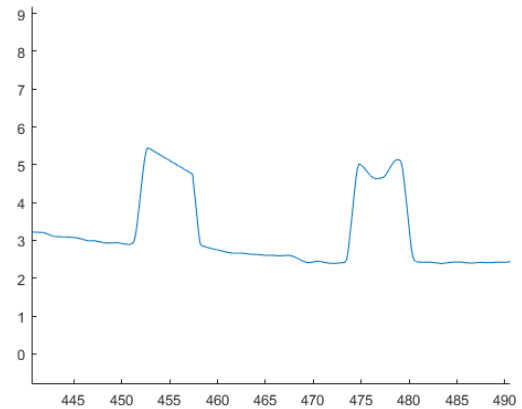


Obr. 3.2: 3D scan pomocou profilometru scanCONTROL

Na ďalších dvoch obrázkoch 3.3 a 3.4 sú zobrazené rezy v osiach X-Z pre krúžok ZKL, kde sa na prvom obrázku jedná o čistý krúžok a na druhom obrázku o krúžok pokrytý olejom.



Obr. 3.3: X-Z rez pre čistý krúžok



Obr. 3.4: X-Z rez pre krúžok pokrytý olejom

Z obrázkov 3.3 a 3.4 je jasné, že profilometer scanControl nemá pri aktuálnej konfigurácii dostatočné rozlíšenie na to, aby sme z neho dostali výsledky, z ktorých by sme mohli vyvodit nejaké závery. Pri naolejovanom krúžku sa navyše vplyvom odrazov a lomov laseru môže stať meranie úplne nepresné. Na rezoch je taktiež vidieť, že nebola dobre skalibrovaná rovina snímača.

3.2 Profilometer scanCONTROL 2900-25/BL

3.2.1 Princíp činnosti a špecifikácia

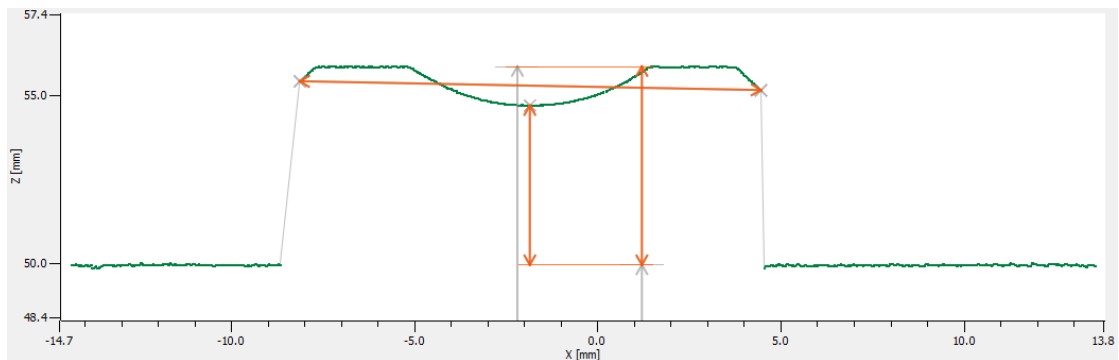
Tento snímač funguje na rovnakom princípe ako snímač popísaný v predchádzajúcej kapitole. Výrobca uvádza rozlišovaciu schopnosť $2\ \mu\text{m}$, 1280 bodov na profil, meraciu rýchlosť až 300 Hz. Minimálna vzdialenosť na snímanie je 53 mm od snímača, maximálna 79 mm od snímača. Tomu zodpovedá rozsah v osi X 23,2 mm až 29,3 mm. Snímač je vybavený modrým 405 nm líniovým laserom [6].

Oproti predchádzajúcemu snímaču máme k dispozícii cca 7,5 krát vyššie rozlíšenie, čo by malo byť pre našu úlohu dostačujúce. Tento snímač nás však limituje v rozsahu v osi X, ktorý je nedostatočný pre ložiská 51311 a vyššie (viď príloha).

3.2.2 Výsledky merania

Pre meranie a vyhodnocovanie nameraných dát bol použitý nástroj scanCONTROL Configuration Tools. Tento softvér za nás spraví všetky operácie pred samotným

meraním (detekcia laseru a transformácia) a taktiež obsahuje základné meracie funkcie ako detekcia extrémov, meranie uhlov, prekladanie bodov priamkou, vzdialenosť dvoch priamok, vzdialenosť bodu od priamky atď. Výstup merania parametrov šírka krúžku, dĺžka profilu a hĺbka obežnej dráhy je vyobrazený na nasledujúcom obrázku. Merané boli parametre šírka krúžku (vzdialenosť medzi priamkou prekladajúcou body podložky a priamkou prekladajúcou rovné plochy profilu), dĺžka profilu (vzdialenosť medzi prvým a posledným bodom profilu) a hĺbka obežnej dráhy (vzdialenosť od najnižšieho miesta obežnej dráhy ku priamke prekladajúcej body podložky).



Obr. 3.5: Výstup merania pomocou nástroja scanCONTROL Configuration Tools

Okrem nástroja scanCONTROL Configuration Tools je k dispozícii aj SDK (Software Development Kit) pre programovacie jazyky C, C++, C# a LabVIEW. V kombinácii s Ethernetovým rozhraním je snímač ľahko integrovateľný do priemyselných meracích systémov.

Merania boli vykonané na čistých ložiskách, aj na ložiskách s vrstvou oleja. Vrstva oleja bola nanášaná náhodne, tomu odpovedajú aj rôzne výsledky a odchylky. Sledované boli tri parametre 1.1 (výška, profil, hĺbka obežnej dráhy). Meranie bolo vykonané na niekoľkých prevedeniach na niekoľkých kusoch z každého prevedania. Pre stručnosť však uvádzam len tabuľky s nameranými hodnotami z niekoľkých exemplárov:

51205 SKF		šírka [mm]	profil [mm]	hĺbka OD [mm]
hriadeľový	čisté	4,559	11,028	3,486
	olej	4,598	11,056	3,591
	rozdiel	0,039	0,028	0,105
priechodzí	čisté	4,520	10,006	3,452
	olej	4,546	9,990	3,548
	rozdiel	0,026	-0,016	0,096

Tab. 3.1: Meranie na 51205 SKF

51115 SKF		šírka [mm]	profil [mm]	hĺbka OD [mm]
hriadeľový	čisté	5,855	12,560	4,693
	olej	5,867	12,545	4,720
	rozdiel	0,012	-0,015	0,027
priechodzí	čisté	5,802	11,554	4,667
	olej	5,825	11,572	4,695
	rozdiel	0,023	0,018	0,028

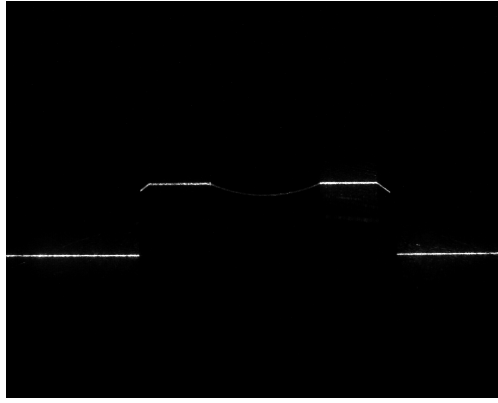
Tab. 3.2: Meranie na 51115 SKF

51113 ZKL		šírka [mm]	profil [mm]	hĺbka OD [mm]
hriadeľový	čisté	5,474	11,470	4,562
	olej	5,483	11,511	4,654
	rozdiel	0,009	0,041	0,092
priechodzí	čisté	5,477	12,540	4,549
	olej	5,545	12,559	4,653
	rozdiel	0,068	0,019	0,104

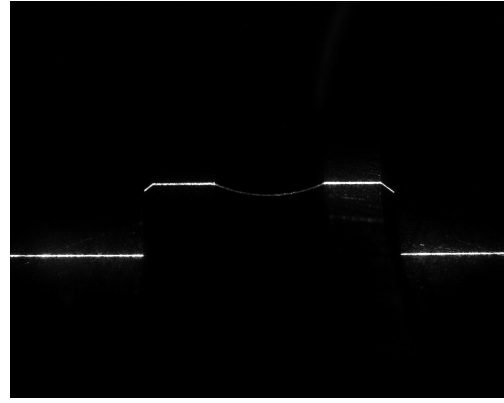
Tab. 3.3: Meranie na 51113 ZKL

Z tabuliek je zrejmé, že olej nezanedbateľne ovplyvňuje výsledok merania. Chyba merania závisí na výške olejovej vrstvy a rovnako aj na rozmeroch ložiska. K najväčšej chybe dochádza podľa očakávania v obežnej dráhe, kde sa usádza najviac oleja. Podľa 4.3 je zrejmé, že skutočná výška oleja je väčšia než zmerané skreslenie. Rozdiel medzi zmeraným skreslením a skutočnou výškou oleja je nepriamo úmerný uhlu medzi snímačom a laserom.

Pri meraní týmto snímačom je možné nastaviť okrem iného aj dĺžku expozície pri snímaní. Nižšia expozícia vedie k menej zašumenému výstupu, avšak môže dojsť k "strate" zosnímaných bodov v oblasti obežnej dráhy. Naopak pri vyššej expozícii získame vyššiu kvalitu snímania v oblasti obežnej dráhy, výstupný snímok však bude viac zašumený.

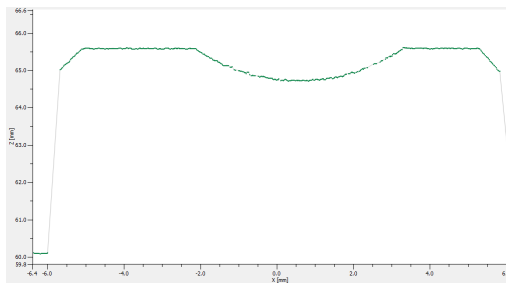


Obr. 3.6: Snímok z čipu pri expozícii 10 ms

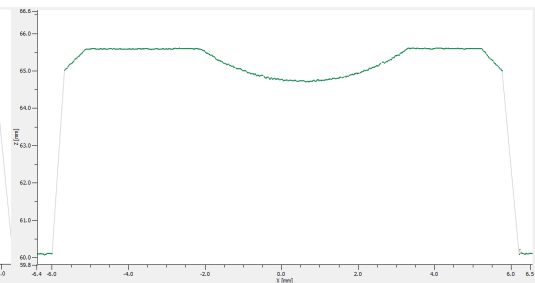


Obr. 3.7: Snímok z čipu pri expozícii 20 ms

Zašumenie a chybná detekcia bodov laseru sa najviac prejaví v prípade, že sa sníma krúžok so zle opracovaným povrchom (snímka profilu so zle opracovaným povrchom sa nezachovala). Na takomto povrchu dochádza k odrazom svetla, ktorý meranie znehodnocuje. Z toho dôvodu by bolo vhodné pri meraní zhotoviť niekoľko snímok pri rôznych expozíciách a merané parametre tak vyhodnocovať z niekoľkých snímok - rovné plochy profilu pri nižších expozíciách a obežnú dráhu pri vyšších expozíciách.



Obr. 3.8: Detail snímaného profilu pri expozícii 10 ms



Obr. 3.9: Detail snímaného profilu pri expozícii 20 ms

Problém s odrazmi na zle opracovaných plochách profilu sa zmiernuje v prípade, že na profile je vrstva oleja. Ako však bolo uvedené vyššie, vrstva oleja je následne dôvod vzniku chyby v meraní.

Posledný z experimentov vykonaný týmto snímačom bolo opakované meranie na jednom profile (opakovateľnosť). Výsledky z opakovaného merania na dvoch typoch krúžkov sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

51113 FAG priech.	šírka [mm]	profil [mm]	hlbka OD [mm]
meranie 1	5,532	11,355	4,465
meranie 2	5,534	11,360	4,483
abs. rozdiel	0,002	0,005	0,018

Tab. 3.4: Opakovateľnosť, 51113 FAG priechodzí

51113 ZKL priech.	šírka [mm]	profil [mm]	hlbka OD [mm]
meranie 1	5,476	11,424	4,592
meranie 2	5,462	11,420	4,605
abs. rozdiel	0,014	0,004	0,013

Tab. 3.5: Opakovateľnosť, 51113 ZKL priechodzí

51113 ZKL hriadel.	šírka [mm]	profil [mm]	hlbka OD [mm]
meranie 1	5,475	12,503	4,550
meranie 2	5,468	12,508	4,544
abs. rozdiel	0,007	0,005	0,006

Tab. 3.6: Opakovateľnosť, 51113 ZKL hriadelový

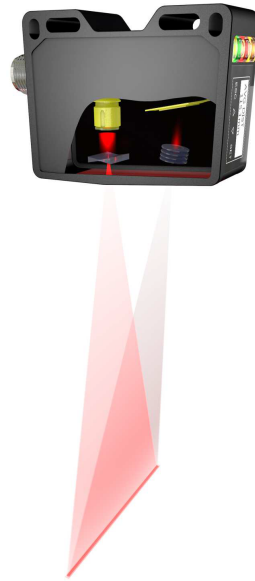
Najväčší rozdiel v meraniach nastáva pri meraní hĺbky obežnej dráhy. Tento parameter sám o sebe nie je zmeraný veľmi presne. Nakoľko nástroj scanCONTROL Configuration Tools neponúka možnosť prekladania bodov kružnicou, tým pádom sa najnižší bod obežnej dráhy určil len priamo zo zosnímaných bodov. Tieto "surové" body sú zafaržené väčšou chybou akou by prípadne bola kružnica napasovaná na tieto body - a to je pravdepodobný dôvod nepresného merania. Ostatné rozdiely sú približne na úrovni výrobcom udávanej rozlišovacej schopnosti. Jediná výnimka je parameter šírka v 3.5, tu mohla mať chyba pravdepodobne iný, neznámy pôvod.

Vykonalé experimenty dokazujú, že snímač je vhodný na meranie ložisiek ktoré nie sú pokryté vrstvou oleja (v prípade vhodnej kombinácie zvolených expozícií a následne vhodnom spracovaní získaných dát). Pre meranie parametrov ložisiek pokrytých olejovou vrstvou je však tento snímač sám o sebe nedostačujúci. Pri meraní by musela byť vopred známa presná výška vrstvy oleja. Ak toto zabezpečené nie je, je nutné navrhnúť metódu merania, ktorá bude chybu vzniknutú lomom svetla na vrstve oleja kompenzovať.

3.3 Výškomer Baumer

3.3.1 Princíp činnosti a špecifikácia

V ďalšom postupe práce som vyskúšal meranie výšky krúžkov pomocou zapožičanej kompaktnej meracej jednotky pre inteligentné meranie výšky PosCon HM OXH7 od firmy Bauer. Merací prístroj PosCon HM opäť funguje na princípe aktívnej triangulácie, rovnako ako to bolo pri senzore micro-epsilon.



Obr. 3.10: Laserový výškomer PosCon HM

PosCon HM meria maximálnu, minimálnu a priemernú výšku, ale tiež poskytuje hodnoty smerodatnej odchylky a hodnotu delta ako rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty výšky, nezávisle na pozícii meraného objektu. Výrobca udáva rozlíšenie až do $2\ \mu\text{m}$ a meraciu frekvenciu až 500 Hz. Meracia vzdialenosť v osi Z je minimálne 100 mm a maximálne 150 mm od snímača. Tomu zodpovedá rozsah v osi X (Field of View) 48 mm až 72 mm. [5]

3.3.2 Výsledky merania

Pri meraní pomocou snímača PosCon som narazil na jeden závažný problém, ktorý sa mi nepodarilo vyriešiť. Problém spočíval v tom, že bolo nemožné snímač správne skalibrovať. Na to, že kalibrácia nie je správna, som prišiel tak, že pri snímaní rovnej plochy pod snímačom mi stále ukazovalo nenulovú deltu - v stotínách, niekedy až v desatine milimetra. Túto skutočnosť som diskutoval s technikom z firmy od ktorej

bol snímač zapožičaný. Pri overovaní tohto problému zistil, že na inom snímači rovnakého typu má rovnaký problém, a tak sa nám túto závalu nepodarilo odstrániť. Aj napriek tomu som však pri meraní prišiel na nasledujúce skutočnosti:

- pri opakovaných meraniach na krúžkoch bez oleja bola smerodatná odchylka v jednotlivých meraniach na úrovni tisícín milimetra
- pri opakovaných meraniach na ložiskách s vrstvou oleja, bola smerodatná odchylka oveľa väčšia

Pre lepšiu predstavu pripájam tabuľky s vyhodnotenými meraniami. Štatistické údaje sú vždy vyhodnotené z desiatich meraní. Ako typ merania bola zvolená delta (rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty výšky). Tabuľka 3.7 zodpovedá hriadeľovému krúžku typu 51102A TRPM, prevedenie ZKL.

51102A ZKL	priemer meraní [mm]	smerodatná odchylka [mm]	chyba [mm]
čisté	2,614	0,002	0,014
olej	2,621	0,023	0,021

Tab. 3.7: Meranie na 51102A ZKL

Tabuľka 3.8 zodpovedá hriadeľovému krúžku typu 51113 TRPM, prevedenie FAG.

51113 FAG	priemer meraní [mm]	smerodatná odchylka [mm]	chyba [mm]
čisté	5,685	0,008	0,085
olej	5,756	0,069	0,156

Tab. 3.8: Meranie na 51113 FAG

Z tabuliek je zrejmé, že prítomnosť oleja na ložiskových krúžkoch ma značný vplyv ako na smerodatnú odchylku (opakovateľnosť), tak aj na chybu (rozdiel skutočná hodnota - priemer) meranej veličiny. Navyše pomerne veľká chyba pri meraní na krúžkoch prevedenia FAG je pravdepodobne spojená s nesprávnou kalibráciou snímača, ktorá bola popísaná vyššie.

Pri prevedení ZKL však chyba nedosahuje až takých hodnôt ako pri prevedení FAG. Povolená výrobná chyba je pri tomto krúžku -0,1 mm. Opäť je pravdepodobné, že chyba môže byť spôsobená nesprávnou kalibráciou. Z toho vyplýva, že v prípade správnej kalibrácie by tento snímač možno mohol byť použiteľný na meranie šírky ložiskových krúžkov (parameter B, viď obrázok 1.1).

4 VLASTNÝ NÁVRH PROFILOMETRA

Vlastný návrh profilometra je možné riešiť ako vhodne usporiadanú kombináciu líniového lasera a plošnej kamery. Oproti priemyslovým profilometrom je značná výhoda v možnosti návrhu na konkrétnu úlohu. Jednoduchšie tak môžeme dosiahnuť požadovaný rozsah v ose X, takisto lepšie rozlíšenie v ose Z pomocou voľby väčšieho uhlu medzi laserom a kamerou (na úkor rozmerov meracieho systému).

4.1 Požiadavky na systém

Finálny systém určený na meranie parametrov axiálnych ložísk by mal byť schopný správneho merania na všetkých typoch a prevedeniach ložísk uvedených v prílohe A.

Vzhľadom k zaistenej "kruhovitosti" meraných ložísk bude stačiť, keď sa meranie bude vykonávať len v jednom reze, len na jednom profile (nemusí sa merať ložisko v celom priemere, ale len jeho jedna časť) - musí však byť zabezpečené meranie v ose súmernosti. V prípade merania celého ložiska (cez celý priemer, v ose súmernosti) síce dostaneme dva rezy a tým pádom by sme teoreticky mohli meranie presnejšie vyhodnotiť, v praxi by sa však výrazne zhoršilo rozlíšenie.

Maximálna dĺžka profilu, ktorá sa medzi uvedenými typmi ložísk nachádza je 32,5 mm. Minimálny rozsah zorného pola v osi X, ktorý je potrebný pre zmeranie všetkých typov ložiskových krúžkov je cca 40 mm (rezerva od 32,5 mm je z toho dôvodu, aby bol v zábere vždy viditeľný aj laser na podložke). Pri tomto rozsahu budeme pri meraní malých krúžkov (s vonkajším priemerom do 40 mm) kamerou vidieť celý krúžok - na profile nameriame málo bodov, ale budeme ich mať dva krát.

Maximálna šírka profilu ktorá sa medzi uvedenými typmi ložísk nachádza je 15,5 mm. To je teoreticky minimálny rozsah zorného pola v druhej osi.

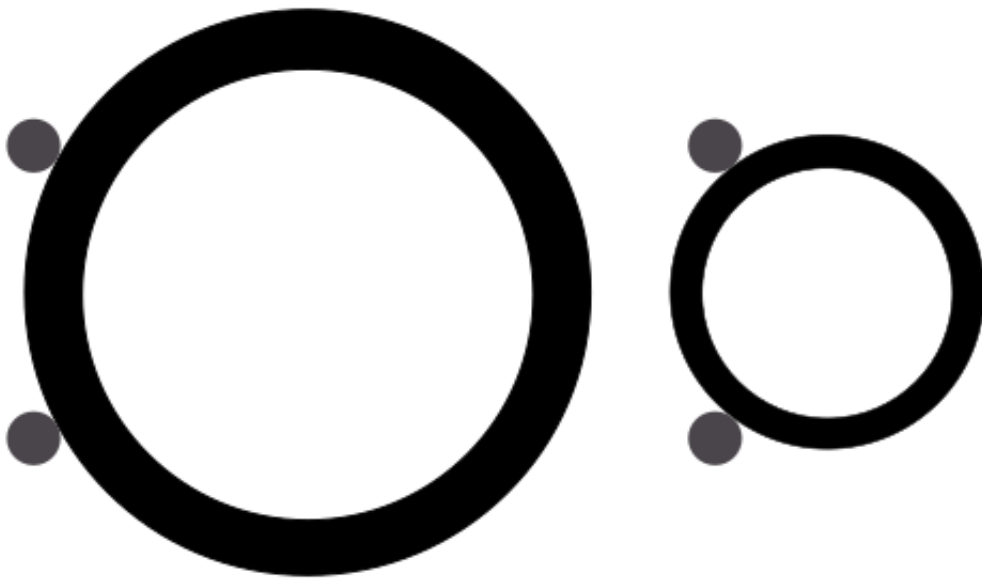
Rozdiel medzi šírkami krúžkov je odstupňovaný po 0,1 mm, s toleranciou -0,05 mm. Minimálne potrebné rozlíšenie v ose Z je teda $50 \mu\text{m}/\text{Px}$, ideálne by však malo byť aspoň o polovicu väčšie, t.j. $25 \mu\text{m}/\text{Px}$. V prípade potreby presného detekovania hĺbky obežnej dráhy by toto rozlíšenie malo byť ešte o niečo presnejšie. Pri vyhodnocovaní viacerých parametrov a použití štatistických metód to však nie je potrebné.

Rozlíšenie v osi X nemusí byť také veľké ako v osi Z, nakoľko skúmané parametre v tejto osi (dĺžka profilu a vonkajší priemer) sú medzi jednotlivými typmi ložísk odstupňované s pomerne veľkými rozstupmi (napríklad rozdiel v dĺžke profilu medzi hriadelovým a priechodzím krúžkom jedného typu ložiska je vždy 1 mm). Tolerancie pri vonkajšom priemere (-0,001 mm) sú optickou cestou prakticky nemerateľné.

4.2 Usporiadanie systému

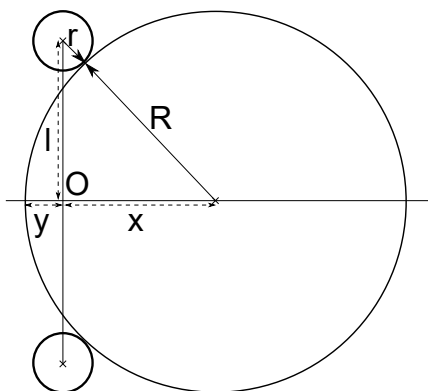
Ložisko bude ležať na rovnej ploche, tj. bude merané zhora. Líniový laser a kamera budú pevne spojené vhodnou bázou a optická osa kamery sa bude pretínať s laserom nad podložkou - laser musí byť viditeľný na podložke aj na samotnom ložiskovom krúžku. Ďalej je nutné vhodne zvoliť nastavenie komponentov - orientácia, vzdialenosť, parametre kamery, atď.

Takisto musí byť zabezpečené presné polohovanie - laser musí prechádzať presne stredom krúžku (cez najširšie miesto - osa symetrie). Toto je možné dosiahnuť presným vycentrovaním ložiska, napríklad jeho usadením do zarážky v tvare písmena "V", prípadne do zarážok podľa obrázku 4.1



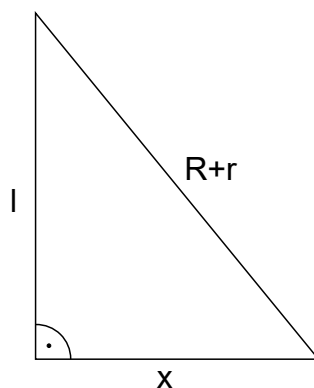
Obr. 4.1: Usadenie ložiska do zarážok

Z obrázku je zrejmé, že čím je menší vonkajší priemer meraného ložiska, tým bude ložisko viac "zanorené" do polohovacích kolíkov. Z toho vyplýva, že pri tomto usporiadaní sme zo zanorenia schopní určiť vonkajší priemer krúžku. Vyjdeme z nasledovnej ilustrácie:



Obr. 4.2: Schéma vnorenia ložiska medzi zarážky

Nech bod O je počiatok nášho súradnicového systému (súradnice $[0,0]$), R je vonkajší polomer ložiska, r je polomer zarážky a l je polovica vzdialenosti medzi zarážkami. Budeme riešiť pravouhlý trojuholník:



Obr. 4.3: Trojuholník tvorený zarážkami a ložiskom

Z Pytagorovej vety vyjadríme vzdialenosť x :

$$x = \sqrt{(R + r)^2 - l^2} \quad (4.1)$$

Vzdialenosť y z obrázku 4.2 následne dostaneme ako:

$$y = R - x \quad (4.2)$$

Po dosadení do uvedených rovníc dostaneme vzdialenosti y pre rôzne polomery R . V našom prípade je vzdialenosť $l = 12,5\text{mm}$ a polomer $r = 3\text{mm}$.

vonkajší priemer [mm]	polomer [mm]	y [mm]
28	14	-2,478
42	21	-0,512
60	30	0,541
90	45	1,344

Tab. 4.1: Príklady zanorenia y pre rôzne priemery

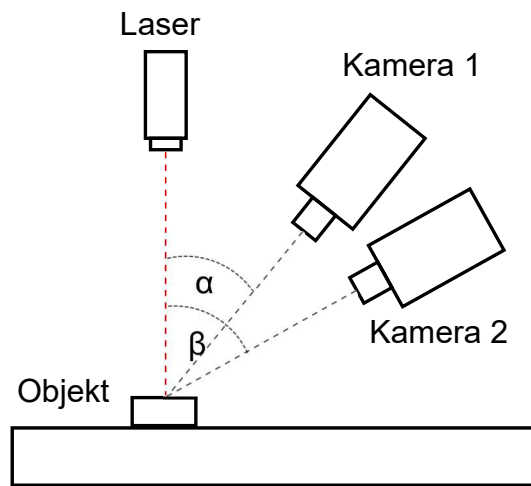
Po správnej kalibrácii systému (počiatok súradnicového systému podľa 4.2) tak bude možné určiť vonkajší priemer ložiska len na základe X-ovej súradnice začiatku profilu.

Ďalšou možnosťou je zabezpečiť translačný pohyb kolmý na laser. To je možné dosiahnuť buď pohybom meracej sústavy ponad ložisko, prípadne pohybom ložiska pod meracou sústavou. Takto by sme získali kompletne 3D meranie a profil by sme vyhodnocovali v najširšom reze tohto merania. V našom prípade sme sa však obmedzili na spôsob popísaný vyššie.

Sledovaný bude výškový profil a ostatné parametre sa budú vyhodnocovať štatisticky, preložením danou krivkou (priamka, kružnica). Takto by bolo možné určiť parametre: šírka krúžku, rádius obežnej dráhy, hĺbka obežnej dráhy, šírka profilu, poloha obežnej dráhy (obrázok 1.1).

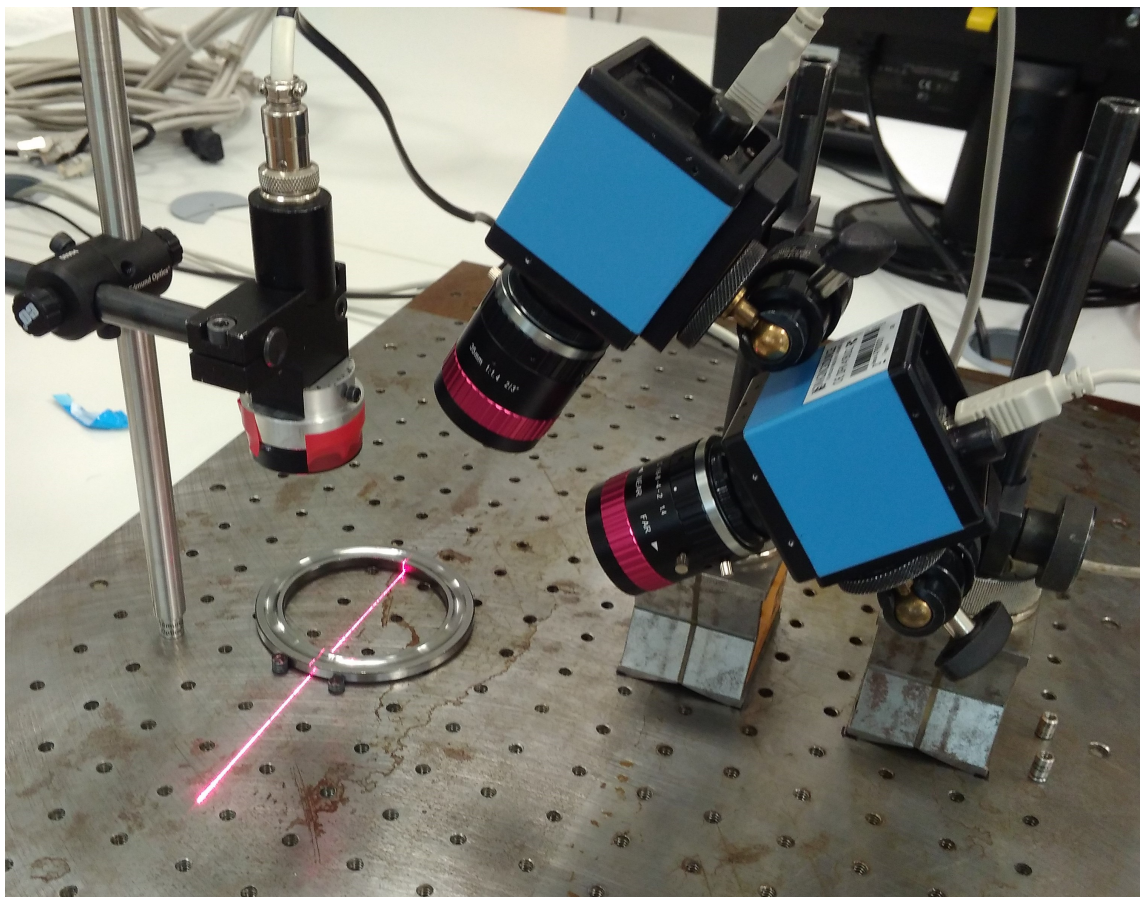
Výškový profil je možné použiť aj k rozlíšeniu hriadelového a priechodzieho krúžku (podľa šírky profilu a umiestnenia obežnej dráhy). Ak bude zisťovaná aj informácia o vonkajšom alebo vnútornom priemere, bude tento systém schopný rozlíšiť aj jednotlivé typy krúžkov. Tento princíp merania pravdepodobne dáva pre jednotlivé krúžky najviac informácií. [1]

Ako už bolo spomenuté, navrhovaný systém musí byť schopný vysporiadať sa s chybou vzniknutou kvôli lomu svetla na vrstve konzervačného oleja (viď kapitola 2.2.3). Za týmto účelom bolo navrhnuté meracie stanovisko, ktoré pozostáva z líniového laseru a dvoch snímačov (kamier), ktoré scénu snímajú pod rôznymi uhlami:



Obr. 4.4: Usporiadanie meracieho systému

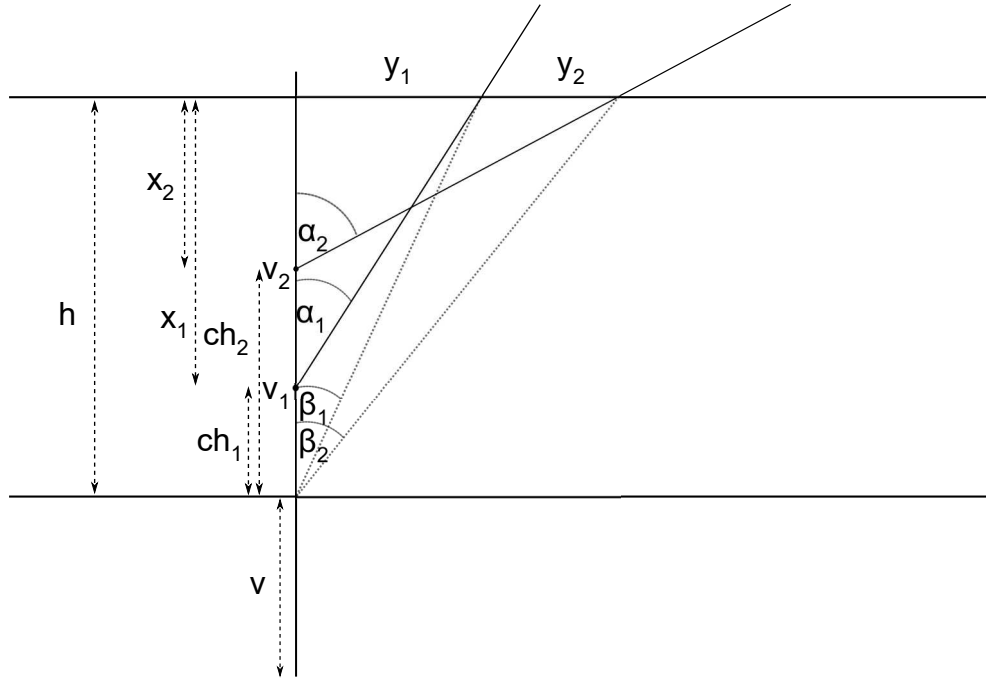
Reálne zostavené pracovisko vyzerá nasledovne.



Obr. 4.5: Meracie pracovisko

4.3 Kompenzácia nepresnosti merania

Chybu merania vzniknutú lomom svetla na vrstve oleja ilustruje obrázok 2.3. Nasledujúci obrázok potom ukazuje, ako sa chyba premietne pri snímaní dvomi kamerami (usporiadanie podľa 4.4).



Obr. 4.6: Chyba pri snímaní dvomi kamerami

Bod O predstavuje skutočné miesto dopadu laserového paprsku, h predstavuje výšku vrstvy oleja, v je výška meraného predmetu, y_1 a y_2 sú vzdialenosti od osi osvieteného bodu ku priesečníkom osí kamier s vrstvou oleja, α_1 , α_2 , β_1 a β_2 sú uhly medzi skutočným respektíve zdanlivým bodom a osami kamier. v_1 a v_2 sú chybné určené zdanlivé body, x_1 a x_2 sú vzdialenosti od zdanlivých bodov ku hladine oleja, ch_1 a ch_2 sú veľkosti chýb.

Pomocou základných goniometrických a trigonometrických funkcií sme schopní vyjadriť jednotlivé neznáme, ktoré sa v ilustrácii vyskytujú.

$$\frac{y_1}{x_1} = \operatorname{tg}\alpha_1 \implies x_1 = \frac{y_1}{\operatorname{tg}\alpha_1} \quad (4.3)$$

$$\frac{y_1}{h} = \operatorname{tg}\beta_1 \implies y_1 = h \cdot \operatorname{tg}\beta_1 \quad (4.4)$$

$$x_1 = h \cdot \frac{\operatorname{tg}\beta_1}{\operatorname{tg}\alpha_1} \implies x_1 = h \cdot K_1 \quad \sim \quad x_2 = h \cdot \frac{\operatorname{tg}\beta_2}{\operatorname{tg}\alpha_2} \implies x_2 = h \cdot K_2 \quad (4.5)$$

Výrazy $\frac{tg\beta_1}{tg\alpha_1}$ a $\frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2}$ sme nahradili konštantami K_1 a K_2 (konštanty jednotlivých kamier). Z obrázku je ďalej zrejmé nasledujúce:

$$ch_2 - ch_1 = v_2 - v_1 = x_1 - x_2 = h \cdot \left(\frac{tg\beta_1}{tg\alpha_1} - \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2} \right) \implies h = \frac{v_2 - v_1}{\frac{tg\beta_1}{tg\alpha_1} - \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2}} \quad (4.6)$$

A po dosadení do 4.5:

$$\begin{aligned} x_2 &= h \cdot \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2} = \frac{v_2 - v_1}{\frac{tg\beta_1}{tg\alpha_1} - \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2}} \cdot \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2} = \frac{v_2 - v_1}{\frac{tg\beta_1 \cdot tg\alpha_2 - tg\beta_2 \cdot tg\alpha_1}{tg\alpha_1 \cdot tg\alpha_2}} \cdot \frac{tg\beta_2}{tg\alpha_2} = \\ &= (v_2 - v_1) \cdot \frac{tg\beta_2 \cdot tg\alpha_1}{tg\beta_1 \cdot tg\alpha_2 - tg\beta_2 \cdot tg\alpha_1} = \frac{v_2 - v_1}{\frac{tg\beta_1 \cdot tg\alpha_2}{tg\beta_2 \cdot tg\alpha_1} - 1} = \frac{v_2 - v_1}{\frac{\frac{tg\beta_1}{tg\alpha_2}}{\frac{tg\beta_2}{tg\alpha_1}} - 1} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v_1}{\frac{K_1}{K_2} - 1} = \frac{(v_2 - v_1)K_2}{K_1 - K_2} \quad \sim \quad x_1 = \frac{v_2 - v_1}{1 - \frac{K_2}{K_1}} = \frac{(v_2 - v_1)K_1}{K_1 - K_2} \quad (4.8)$$

Z predchádzajúceho sme schopní určiť skutočnú výšku v a chyby ch_1 a ch_2 :

$$\begin{aligned} v &= v_2 - ch_2 = v_1 - ch_1 = v_2 + x_2 - h = v_2 + \frac{(v_2 - v_1)K_2}{K_1 - K_2} - \frac{v_2 - v_1}{K_1 - K_2} = \\ &= \frac{v_2(K_1 - K_2) + (v_2 - v_1)K_2 - (v_2 - v_1)}{K_1 - K_2} = \frac{v_1(1 - K_2) - v_2(1 - K_1)}{K_1 - K_2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} ch_2 &= h - x_2 = \frac{v_2 - v_1}{K_1 \cdot K_2} - \frac{(v_2 - v_1)K_2}{K_1 - K_2} = \frac{(v_2 - v_1)(1 - K_2)}{K_1 - K_2} \\ ch_1 &= \frac{(v_2 - v_1)(1 - K_1)}{K_1 - K_2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Konštanty kamier je možné získať dvoma rôznymi prístupmi.

- konštanty vypočítame z uhlov a indexu lomu oleja - obtiažne presné zmeranie uhlov
- kalibráciou podľa 4.11

$$x_1 = h \cdot \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} = h \cdot K_1 = h - ch_1 \implies K_1 = \frac{h - ch_1}{h} \sim K_2 = \frac{h - ch_2}{h} \quad (4.11)$$

Výšku hladiny h si tu presne nastavíme (v našom prípade zmeraním pomocou konfokálneho snímača confocalDT IFS2405 od firmy Micro-Epsilon) a chyby ch_1 a ch_2 zmeriame.

K_1 a K_2 tu síce vystupujú ako konštanty, ale v reále budú na celom snímku konštantné len v prípade, že použijeme ideálny telecentrický objektív (vid. 4.4.3). Závislosť K_1 a K_2 na polohe v obraze si overíme ďalej.

4.4 Snímacia sústava

Podstatnou časťou pri realizácii 2D triangulačnej metódy je vhodný výber snímačej sústavy - kamery a objektívu. Nasledujúce kapitoly sa práve tomuto budú venovať.

Väčšina popisu bude v jednotnom čísle, myslia sa tým však vždy dve kamery a dva objektívy, nakoľko meracia sústava obsahuje dva snímače, ktoré sú identické.

4.4.1 Kamera

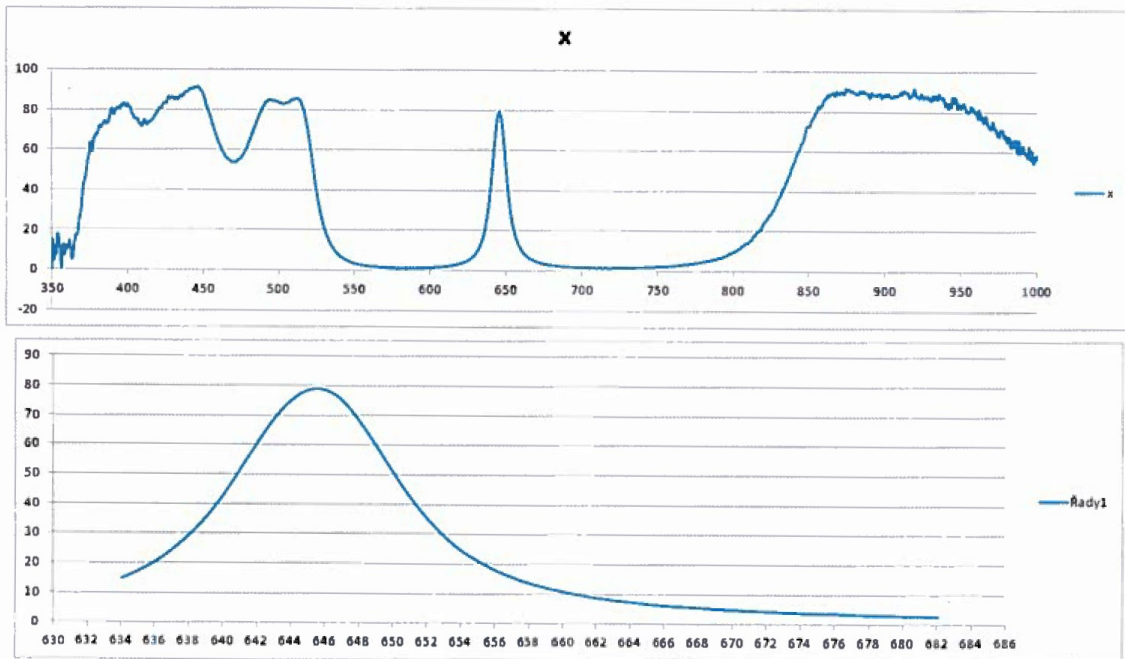
Úlohou kamery je prenesenie snímanej scény na elektrický signál. V našom prípade bola zvolená kamera dostupná v školskom laboratóriu - Imaging Source DFK 41BU02. Parametre tejto kamery sú nasledujúce[7]:

- farebná (RGB) priemyselná USB 2.0 kamera
- rozlíšenie 1280×960 *Px*
- maximálna frekvencia 15 snímok za sekundu (*fps*)
- 256 stupňov jasovej škály (8 *bit*)
- CCD 1/2" senzor Sony ICX205AK s veľkosťou pixelu $4,65 \mu\text{m} \times 4,65 \mu\text{m}$
- C/CS závit pre objektív
- USB 2.0 komunikačné rozhranie
- uzávierka 0,1 *ms* až 30 *s*
- gain 0 *dB* až 36 *dB*
- vyváženie bielej -2 *dB* až 6 *dB*



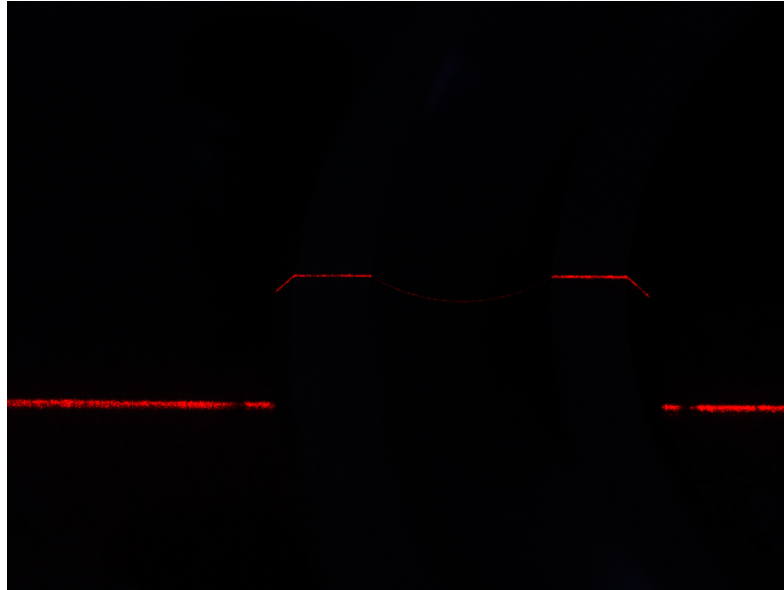
Obr. 4.7: Kamera Imaging Source DFK 41BU02[7]

Pred čip kamery bol vložený filter, ktorý mal za úlohu vyfiltrovať zložky svetla iné, ako vlnová dĺžka nami použitého laseru (650 nm). Z nasledujúcej charakteristiky je zrejmé, že okrem červenej zložky filter prepúšťa aj nižšie a vyššie vlnové dĺžky optického žiarenia. Preto pre spracovanie a vyhodnotenie snímok bola použitá červená zložka obrazu, z ktorej filter prepúšťa práve len úzke pásmo, ktoré nás zaujíma.

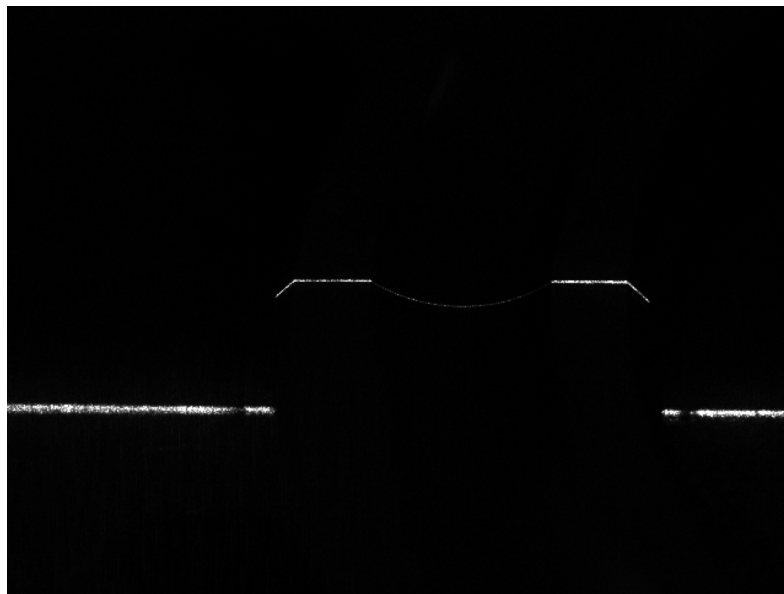


Obr. 4.8: Spektrálna charakteristika použitého filtru

Na x-ovej osi je vlnová dĺžka, na y-ovej osi je percento žiarenia, ktoré filter na danej vlnovej dĺžke prepustí. Na vrchnej časti obrázka je charakteristika pre celé spektrum od ultrafialového žiarenie až po infračervené, na spodnej časti je detail v okolí 650 nm. Zhotovená snímka s týmto filtrom v RGB verzii je zobrazená na 4.9. Na ďalšom obrázku je červený kanál pôvodnej snímky.



Obr. 4.9: RGB snímka s filtrom



Obr. 4.10: Červený kanál pôvodnej snímky

4.4.2 Objektív

Objektív je ďalšia dôležitá súčasť snímacieho zariadenia. Jeho funkcia spočíva v zaostrení skúmaného objektu do obrazovej roviny snímača. Objektív sa skladá z clonky a zo sústavy čočiek. Jeho optické parametre sú ďalej definované ohniskovou vzdialenosťou, minimálnou pracovnou vzdialenosťou, svetlosťou, skreslením atď. Pre našu úlohu bol zvolený objektív s pevným ohniskom od firmy VICO imaging

MFA1-230-5M35. Parametre objektívu[8]:

- ohnisková vzdialenosť 35 mm
- minimálna pracovná vzdialenosť 200 mm
- veľkosť senzoru 2/3"
- orientačné rozlíšenie 5 MPx
- skreslenie 0,1 %



Obr. 4.11: Objektív VICO imaging MFA1-230-5M35[8]

Je nutné ešte dodať, že pri zostavovaní meracieho systému boli medzi telom kamery a objektívom použité distančné krúžky. Ich nasadením medzi kamerou a objektívom umožníme objektívu ostríť na kratšiu vzdialenosť. Medzikrúžky nepredlžujú ohnisko objektívu ani neovplyvňujú ostrosť obrazu, len skrátia vzdialenosť na ktorú dokáže objektív zaostríť. Vďaka tomu sme schopní zostaviť meracie stanoviisko v kompaktných rozmeroch - zmenšenie bázy medzi kamerami a laserom.

4.4.3 Parametre a obmedzenia snímacej sústavy

Použité kamery pri svojej veľkosti čipu (1/2") snímajú menší rozsah než by bolo v realite potrebné. Cieľ však bol vyskúšať a overiť funkčnosť systému s kamerami ktoré boli aktuálne k dispozícii. V praxi by sa potom použili kamery napríklad s dva krát väčším rozlíšením a dva krát väčšou veľkosťou čipu - rozlíšenie celého systému by tak zostalo približne rovnaké ako aktuálne, ale získali by sme dva krát väčší rozsah snímanej scény.

Pri aktuálnej zostave sa dostávame k nasledujúcemu. Senzor kamery má rozlíšenie 1280x960 Px, zorné pole v osi X je pri oboch kamerách cca 26 mm. Uhol medzi

kamerou 1 a laserom je cca 30° , medzi kamerou 2 a laserom cca 55° . K rozsahom v ose X sa dostaneme nasledovne:

$$roz_x = \frac{zp_x}{px_x} \quad (4.12)$$

Kde roz_x je výsledné rozlíšenie v osi X, zp_x je zorné pole v osi X a px_x je počet pixelov v osi X. Obdobne sa dostaneme k rozlíšeniu v osi Z:

$$roz_z = \frac{roz_x}{\sin\alpha} \quad (4.13)$$

Kde roz_z je výsledné rozlíšenie v osi Z a α je uhol medzi kamerou a laserom. Po dosadení do rovníc sa dostaneme k nasledujúcim rozlíšeniam:

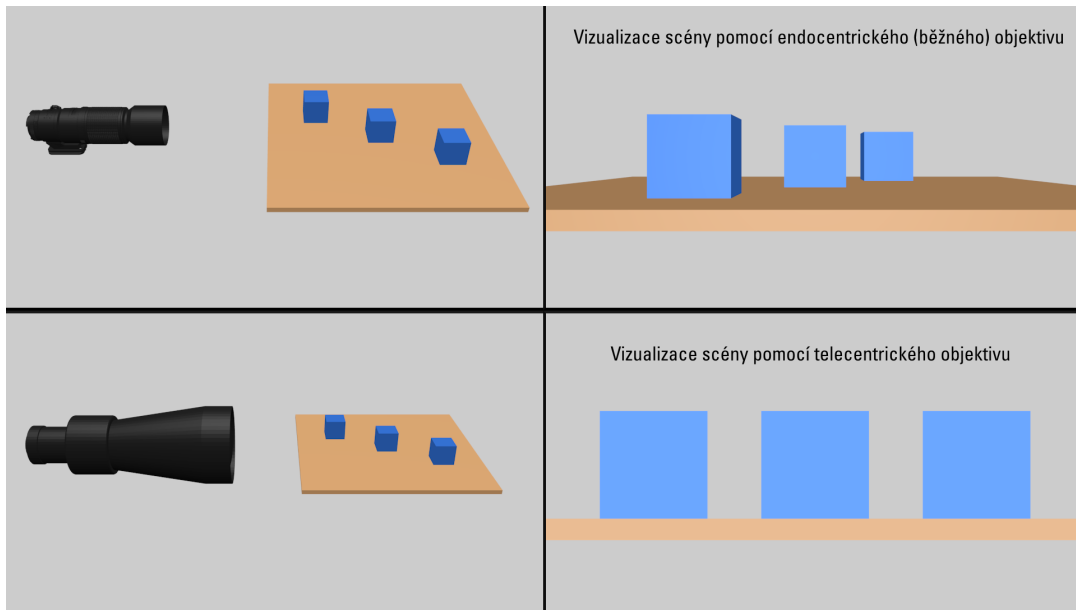
kamera	rozlíšenie v osi X [$\mu\mathbf{m}$]	rozlíšenie v osi Z [$\mu\mathbf{m}$]
1	~ 20	~ 40
2	~ 20	~ 24

Tab. 4.2: Rozlíšenie sústavy

Sústava je, ako už bolo spomenuté, obmedzená aj zorným polom. Pre väčšie rozsahy v zornom poli by bolo nutné použiť kamery s väčším čipom a väčším rozlíšením.

Samotný objektív s pevným ohniskom (endocentrický) nie je úplne ideálny pre meracie úlohy ako je táto. Ideálne by bolo použitie telecentrického objektívu. Jeho výhoda spočíva v tom, že čočkou prejdú len rovnobežné paprsky. Obraz má potom len zanedbateľnú deformáciu a taktiež sa vyhneme skresleniu danému perspektívou - jedná sa o takzvanú paralelnú projekciu. Rozdiel medzi klasickým a telecentrickým objektívom je vidieť na obrázku 4.12.

Vzhľadom k vysokej cene telecentrických objektívov boli v tejto práci použité iba endocentrické objektívy. Nepriaznivý vplyv perspektívy je však v našom prípade čiastočne potlačený vždy rovnakým umiestnením meraného predmetu vzhľadom ku kamere.



Obr. 4.12: Rozdiel zobrazenia scény pomocou endocentrického a telecentrického objektivu[9]

4.5 Kalibrácia systému

Ako bolo naznačené v kapitole 2.2 (sekcia 2D triangulácia), prevod medzi súradnicami premietnutého bodu na snímač kamery a skutočnými bodmi v priestore je možný dvoma spôsobmi.

Prvý spôsob je matematické riešenie. To spočíva vo výpočte vzdialenosti bodu, pričom je známa vzdialenosť medzi kamerou a laserom (báza), uhol pod ktorým laser vysiela paprsok a uhol pod ktorým kamera zachytáva premietnuté body. Tieto tri veličiny tvoria trojuholník, z ktorého je pomenovaná táto metóda merania - triangulačný trojuholník. Z tohto popisu je určite zrejmé, že hlavná nevýhoda tohto matematického riešenia je nutnosť presne poznať vzájomnú polohu kamery a laseru (veľmi obtiažne zmerateľné, navyše by sa meranie muselo opakovať pri každej aj minimálnej zmene v rozostavení systému), takisto by mohlo byť problematické zohľadniť nelinearity (deformácie) kamery.

Druhý spôsob je kalibrácia meracieho systému. Kalibrácia spočíva v naskenovaní známeho (kalibračného) objektu. Následne je možné vytvoriť zosúhlasené dvojice bodov - skutočné súradnice bodov v priestore (známe z rozmerov kalibračného predmetu) a súradnice bodov zosnímaných kamerou. Z takto získaných dvojíc bodov sa vypočíta transformačná matica. Pri skenovaní neznámeho objektu sa následne transformačná matica použije k prepočtu nasnímaných bodov na skutočné body v priestore. Oproti matematickému riešeniu nám teda odpadáva potreba presne po-

znať vzájomnú polohu kamery a laseru. Poloha sa ale po kalibrácii nesmie zmeniť. Kalibrácia takisto kompenzuje prípadné nelinearity objektívu a kamery.

4.6 Transformačná matica

Transformačná matica predstavuje vzťah medzi súradnicami v trojrozmernom priestore X, Y, Z a dvojrozmernom priestore kamery U, V . Úlohou kalibrácie je teda nájsť túto transformačnú maticu, ktorá nám následne slúži na výpočet 3D súradníc len z 2D súradníc snímku kamery. V našom prípade sa transformácia zjednoduší na transformáciu z roviny do roviny (X, Z do U, V), pretože súradnica Y nás pri meraní parametrov profilu nezaujíma (za predpokladu že meriame v ose symetrie). Transformačná rovnica potom dostáva tvar:

$$\begin{bmatrix} wX \\ wZ \\ w \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Vektor na ľavej strane rovnice predstavuje reálne súradnice v priestore (v milimetroch), T predstavuje transformačnú maticu rozmeru 3×3 , vektor na pravej strane predstavuje súradnice v priestore kamery (v pixeloch). Aby bolo možné výpočet použiť pre súbor bodov, rozšírime matice nasledovne.

$$B \cdot t = x \quad (4.15)$$

Rozšírenie vychádza z metódy najmenších štvorcov a je z neho možné vypočítať vektor t , ktorý nám posluží na výpočet transformačnej matice T . Maticový zápis môžeme ďalej rozpísať takto:

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 \cdot x_1 & -v_1 \cdot x_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 \cdot z_1 & -v_1 \cdot z_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_2 \cdot x_2 & -v_2 \cdot x_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -u_2 \cdot z_2 & -v_2 \cdot z_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Každé dva riadky v matici B a každé dva riadky vo vektore x predstavujú jednu dvojicu zosúhlasených bodov. Potom je jasné, že pre výpočet tejto úlohy potrebujeme minimálne 4 takéto dvojice. Vektor t určíme zo vzťahu:

$$t = B^* \cdot x \quad (4.17)$$

Kde B^* je pseudo-inverzná matica:

$$B^* = [B^T \cdot B]^{-1} \cdot B^T \quad (4.18)$$

Z vypočítaného vektora t poskladáme transformačnú maticu T nasledovne:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

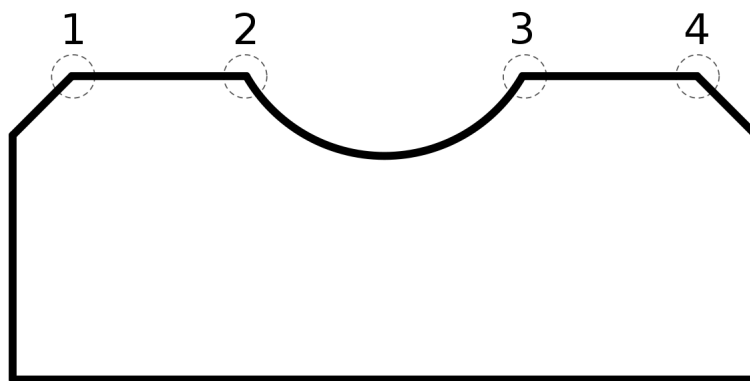
4.7 Návrh kalibračnej metódy

Pri kalibrácii optického systému je nutné vybrať a použiť vhodný kalibračný predmet. Takýto predmet by mal byť vyrobený dostatočne presne a mal by mať nám presne známe rozmery vo všetkých osiach, v ktorých kalibráciu robíme (v našom prípade nás zaujímajú 2 osi - x a z).

V našom prípade bol pre voľbu kalibračného predmetu zvolený mierne nekonvenčný postup. Ako kalibračné predmety nám poslúžili samotné ložiskové krúžky, ktorých presné rozmery sme získali ich zmeraním pomocou laserového skeneru Micro-epsilon (viď kap. 3.1). Dáta získané profilmerom Micro-epsilon teda poslúžili ako kaliber (referencia). Nami navrhovaným meracím systémom sa následne zosnímali tie isté ložiskové krúžky z ktorých boli získané kalibračné dáta (snímalo sa v rovnakých miestach ako snímačom Micro-epsilon, aby sa minimalizovala možnosť vzniku chyby).

Samotný algoritmus kalibrácie je obsiahnutý v m-file *calibration.m*. Postup je nasledovný:

1. vyberieme vhodné ložiskové krúžky a zosníame ich našim meracím systémom
2. po spustení skriptu *calibration.m* sú nám postupne predkladané snímky z predchádzajúceho kroku, pre jednu respektíve druhú kameru
3. snímku si vždy priblížime aby sme čo najpresnejšie videli požadovanú oblasť (obr. 4.13)
4. po priblížení potvrdíme klávesou Enter a postupne vyberieme body v poradí ako je ilustrované na obrázku 4.13. Klávesami Delete/Backspace v prípade potreby odstránime posledný vybraný bod.
5. po vybratí všetkých bodov opäť potvrdíme klávesou Enter. Bude nám predložená snímka z druhej kamery respektíve snímka ďalšieho krúžku
6. kroky opakujeme pre všetky kalibračné snímky
7. po vybratí všetkých kalibračných bodov prebehne výpočet podľa kapitoly 4.6.



Obr. 4.13: Výber kalibračných bodov

Následne prebehne spätné overenie správnosti kalibrácie. To prebieha v nasledujúcich krokoch.

1. všetky kalibračné body, ktoré boli vybraté v prvom kroku kalibrácie, sa podľa vypočítaných transformačných matíc transformujú z U, V súradného systému do X, Z súradného systému
2. po transformácii sa určí chyba medzi každým transformovaným bodom a jemu prislúchajúcim skutočným bodom (kaliber)
3. ak chyba presiahne určitý prah (v našom prípade bol stanovený na 0,05 mm), daný bod sa označí ako nesprávny
4. výpočet kalibračných matíc prebehne znova, ale tento krát bez bodov, ktoré boli v predchádzajúcom kroku vylúčené

Tieto kroky by mali zabezpečiť minimalizovanie chyby pri hľadaní transformačných matíc.

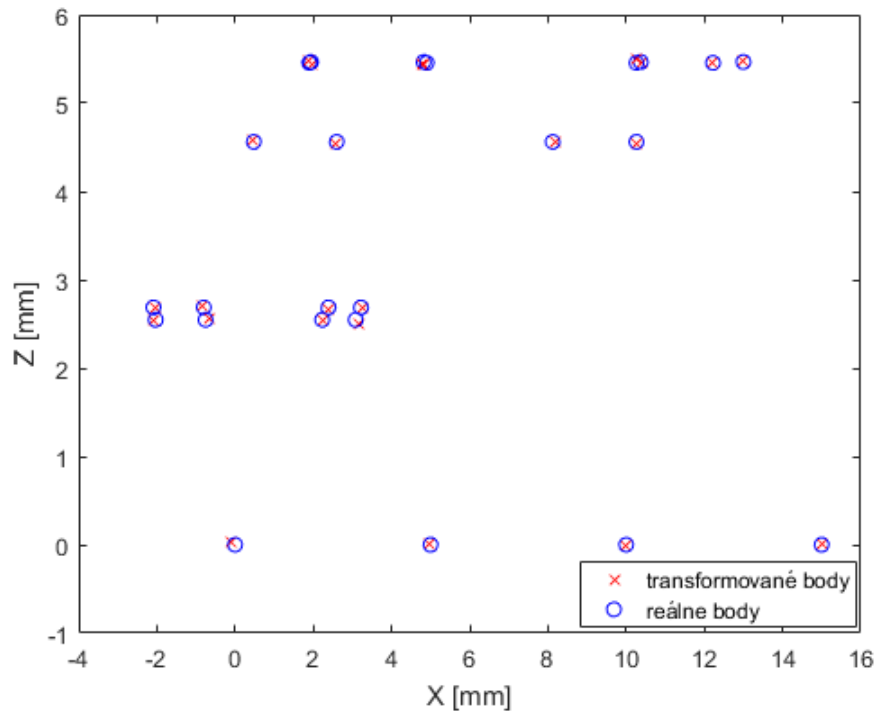
Pri kalibrácii bolo použitých 5 ložiskových krúžkov, a na záver bola zosnímaná samotná podložka bez ložiska. Na podložke boli zaznačené 4 kalibračné body, ktoré boli taktiež nutné ku kalibrácii, pretože bez nich fungovala kalibrácia nesprávne v spodnej časti meracej roviny. Z toho vyplýva, že pri kalibrácii je potrebné čo najlepšie pokryť kalibračnými bodmi celú rovinu, v ktorej chceme následne merať.

Príklad vybraných súradníc U a V pre jednu, respektíve druhú kameru a im prislúchajúcim reálnym kalibračným bodom ukazuje nasledovná tabuľka:

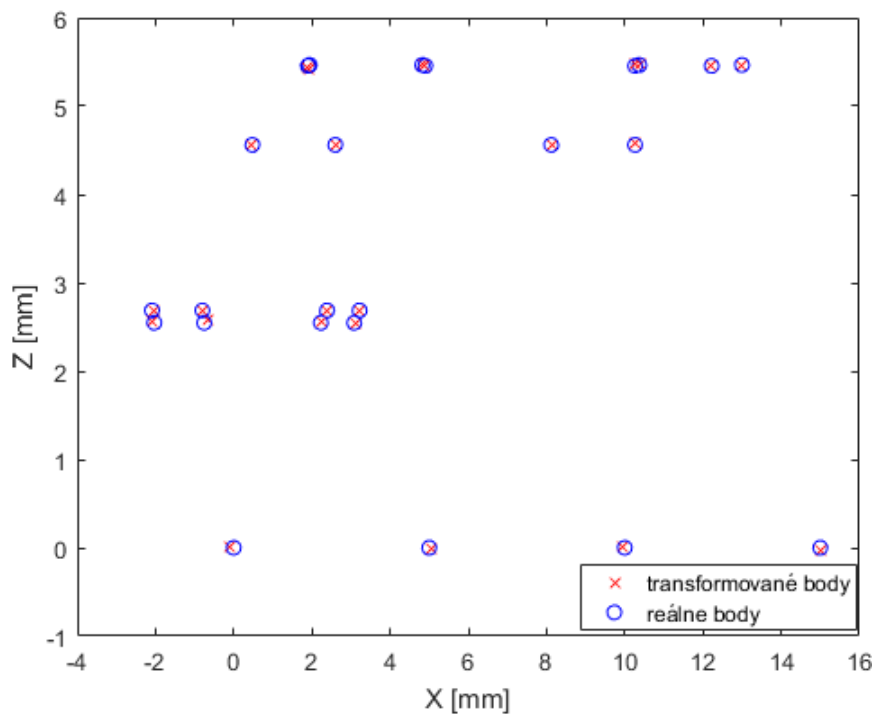
U1	V1	U2	V2	X	Z
451	455	463	454	1,943	5,466
594	455	603	453	4,822	5,466
871	455	878	454	10,374	5,466
1001	455	1005	456	12,998	5,466
379	474	395	487	0,477	4,561
485	475	498	489	2,598	4,561
762	475	770	490	8,122	4,561
866	476	872	490	10,264	4,561
265	517	280	560	-2,0863	2,687
325	517	341	560	-0,8023	2,687
482	518	494	562	2,3867	2,687
524	518	535	562	3,2177	2,687
265	521	280	565	-2,03	2,547
334	521	349	565	-0,754	2,547
476	521	490	566	2,228	2,547
521	522	532	567	3,082	2,547
447	454	460	454	1,897	5,456
592	455	606	454	4,901	5,456
866	454	872	454	10,265	5,456
961	455	965	455	12,223	5,456
372	577	386	662	0,0	0,0
614	577	632	664	5,0	0,0
855	578	863	665	10,0	0,0
1098	578	1105	667	15,0	0,0

Tab. 4.3: Zoznam kalibračných bodov

Grafické zobrazenie odchýliek v kalibrácii je možné vidieť na obrázkoch 4.14 a 4.15. Grafické znázornenie veľkosti chyby pre jednotlivé kalibračné body je potom na obrázku 4.16

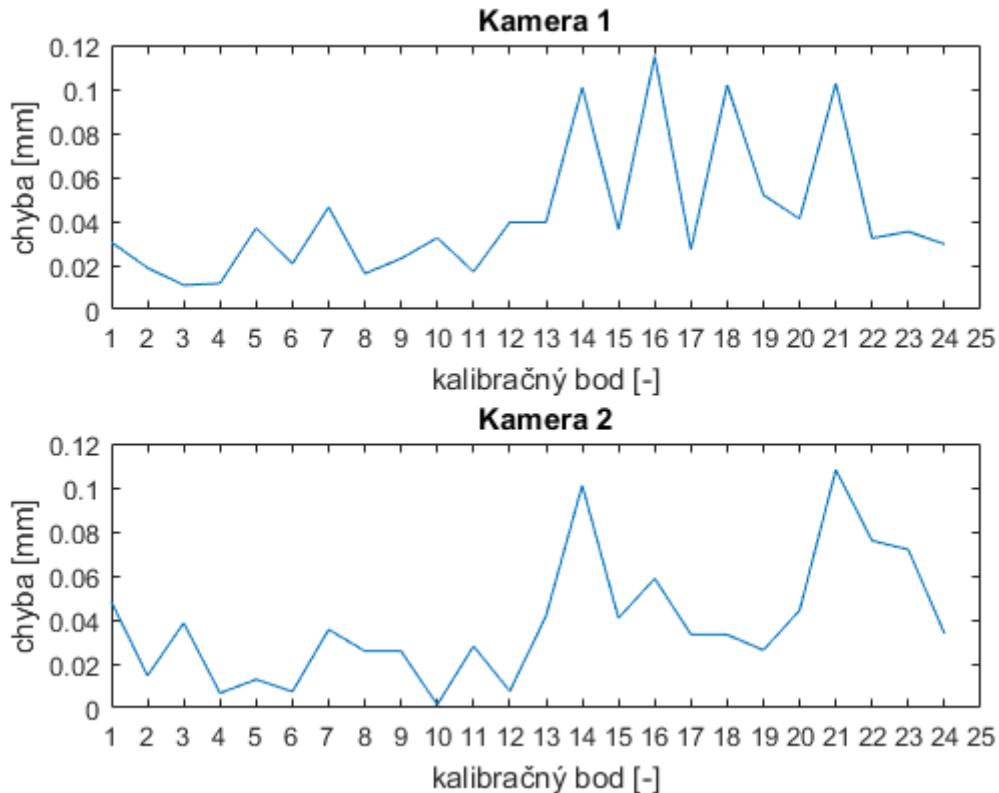


Obr. 4.14: Chyby kalibrácie, kamera 1



Obr. 4.15: Chyby kalibrácie, kamera 2

Na grafoch je vidieť, že v rovine by bolo ideálne pridať niekoľko kalibračných bodov, a to hlavne v štvorci X(4:16), Z(0:4). V našom prípade to nebolo možné vzhľadom k obmedzenosti dostupných ložiskových krúžkov. Tento problém by vyriešil napríklad vhodne navrhnutý kalibračný predmet, ktorému sa bude venovať nasledujúca kapitola.



Obr. 4.16: Veľkosť chýb jednotlivých kalibračných bodov

Z vypočítaných chýb jednotlivých bodov sme schopní určiť celkovú chybu kalibrácie, napríklad ako priemer sumy štvorcov jednotlivých odchýliek.

$$chyba_1 = \frac{1}{n} \sum_{bod=1}^n odchylnka_1[n]^2 = 0,0027 \quad (4.20)$$

$$chyba_2 = \frac{1}{n} \sum_{bod=1}^n odchylnka_2[n]^2 = 0,0020 \quad (4.21)$$

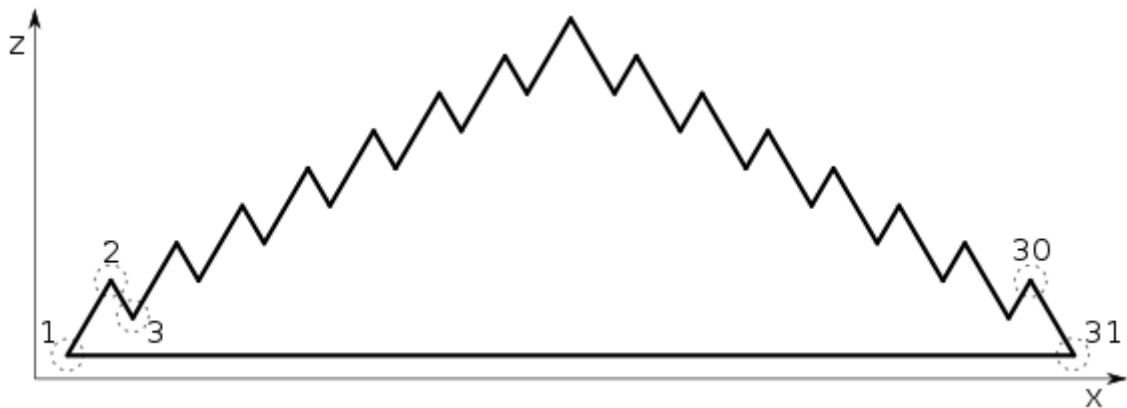
Kde n je n -tý bod kalibrácie. Po vyradení bodov, ktorých odchýlnka bola väčšia ako stanovený prah sa kalibračné chyby znížia.

Vypočítané transformačné matice pre obidve kamery sa uložia do .mat súboru *transform_matrices.mat*. Tieto matice budú následne použité pre transformáciu súradníc pri samotnej meracej aplikácii.

Na záver je dôležité si uvedomiť, že akýkoľvek fyzický zásah do meracej sústavy znehodnocuje poslednú vykonanú kalibráciu (nájdené transformačné matice sú neplatné). Po každom zásahu (aj nepatrnom) do meracej sústavy je teda nutné kalibráciu vykonať nanovo. Takisto je vhodné systém skalibrovať aj keď sa s ním dlhší čas nemeralo.

4.7.1 Návrh kalibračného predmetu

Ako bolo v úvode tejto kapitoly spomenuté, pre kalibráciu sa väčšinou používa vhodný a presný kalibračný predmet. Takýto vhodne navrhnutý predmet by bol oproti vyššie popísanej metóde vhodnejší (rýchlejšia kalibrácia, možnosť naprogramovania automatickej detekcie významných bodov, pravdepodobná vyššia presnosť, atď.). Príklad profilu takéhoto predmetu je na obrázku 4.17. X-ové a Z-ové súradnice "zubov" na tomto predmete by boli presne a pravidelne definované (napríklad medzi bodmi 1 a 2 by bola $\delta_X = 0,4mm$, $\delta_Z = 0,8mm$, medzi bodmi 2 a 3 potom $\delta_X = 0,2mm$, $\delta_Z = 0,4mm$, atď.)



Obr. 4.17: Profil kalibračného predmetu

Výhodou takéhoto predmetu spočíva v tom, že by na skalibrovanie stačilo jedno zosnímanie každou kamerou. Detekcia kalibračných bodov sa taktiež zjednoduší len na detekciu rohov premietnutej laserovej čiary, čo je jednoducho naprogramovateľné a algoritimizovateľné. Rozmery tohto predmetu a počet "zubov" by sa prispôbili podľa potreby.

4.8 Detekcia laserovej čiary

Presnosť laserového profilometru je jednoznačne priamo spojená s presnosťou detekcie laserovej čiary. Existuje mnoho princípov a prístupov ako laser detekovať,

no mnohé sú obmedzené detekciou len s pixelovou presnosťou (dané tým, že senzor kamery, ktorá laserovú čiaru sníma, má pevné rozlíšenie dané veľkosťou pixelu).

Šírka zosnímanej laserovej čiary sa pohybuje väčšinou v jednotkách až desiatkach pixelov (dané šírkou stopy laseru, veľkosťou snímanej plochy a dĺžkou expozičnej doby). Z tohoto dôvodu je presnosť detekovania "stred" snímanej čiary pomerne náročná, avšak veľmi dôležitá.

Tu použitá metóda implementuje postupnú konvolúciu stĺpcov obrázku s invertovanou druhou deriváciou Gaussovej krivky ako konvolučným jadrom a následné preloženie bodov získaných z odozvy konvolúcie parabolou, kde hľadáme maximum paraboly a tento bod prehlasujeme za stred laserovej stopy (stred so subpixelovou presnosťou).

4.8.1 Konvolúcia

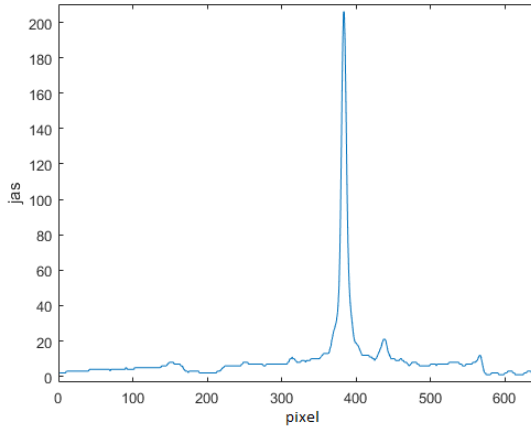
Vďaka znalosti o tom, že laserová čiara sa na snímke nachádza v približne horizontálnej polohe, ju môžeme detekovať pomocou konvolúcie jednotlivých stĺpcov obrázku (jasové hodnoty pixelov jedného stĺpca sú použité ako konvoluovaný signál pre diskretnú konvolúciu). Jas snímanej laserovej čiary má rozloženie podobné Gaussovemu (normálnemu) rozloženiu. Pôvodný návrh používal ako jadro konvolúcie jednoduchú Gaussovú krivku, následným experimentom s invertovanou druhou deriváciou Gaussovej krivky sa však ukázalo, že táto krivka ako jadro konvolúcie funguje robustnejšie a dosahuje lepšie výsledky.

Diskretnú konvolúciu definujeme ako:

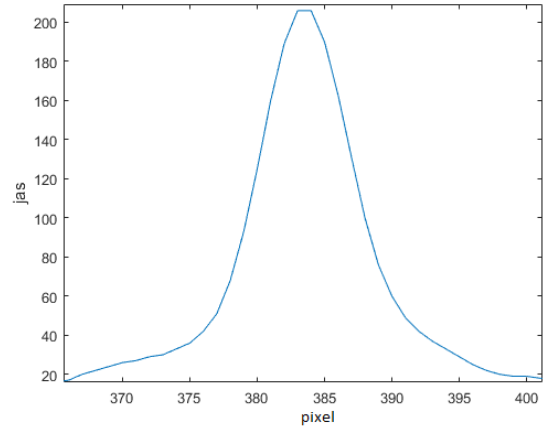
$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[n - m] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[n - m]g[m] \quad (4.22)$$

kde f je konvoluovaný signál (číselná rada), g je jadro konvolúcie, m je m -tý prvok signálu f , n je n -tý prvok jadra g .

K detekcii použijeme červenú zložku snímky 4.4.1. Červená zložka daného jedného stĺpca snímky je často zasaturovaná v mieste kde sa nachádza laser (prípadne na ďalších miestach - odrazy) a ododzva na laser môže mať plochý vrchol - niekoľko pixelov vedľa seba má rovnakú hodnotu. Tieto 2 problémy sa dajú čiastočne vyriešiť rozostrením obrázku. To je zobrazené na nasledovných obrázkoch.



Obr. 4.18: Hodnoty pixelov v stĺpci



Obr. 4.19: Detail plochého vrcholu

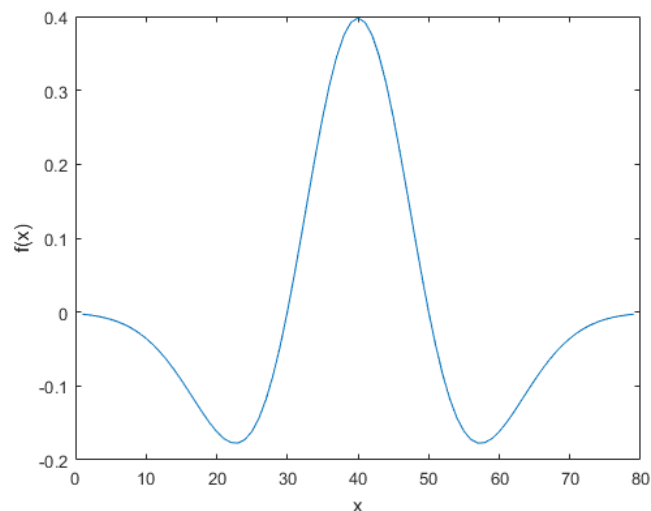
Ako bolo spomenuté, ako konvolučné jadro je použitá invertovaná druhá derivácia Gaussovej krivky (normálneho rozdelenia). Normálne rozdelenie je definované hustotu pravdepodobnosti v tvare:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.23)$$

kde μ je stred distribúcie a σ je štandardná odchylka. Jeho druhá derivácia je potom v tvare:

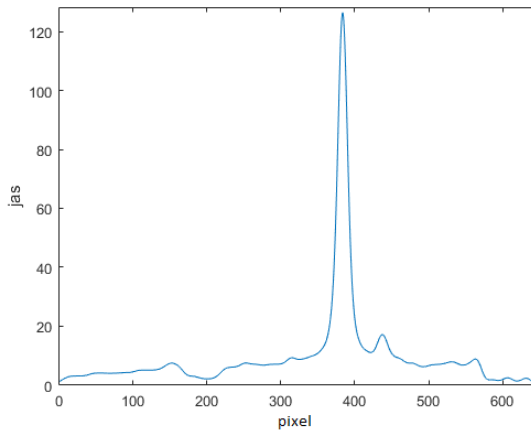
$$f''(x) = \frac{e^{\frac{\mu-x}{2\sigma^2}}}{4\sqrt{2\pi}\sigma^2} \quad (4.24)$$

Invertovaním (pre násobenie -1) tohto vzťahu dostaneme požadované konvolučné jadro.

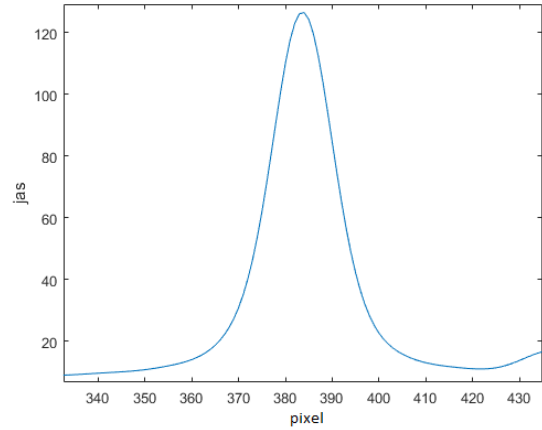


Obr. 4.20: Invertovaná druhá derivácia normálneho rozloženia

Odozva na konvolúciu nám ukazuje, že vrchol krivky nie je symetrický. Tým pádom sa stred laserovej čiary nachádza niekde medzi osvetlenými pixelmi. Pre zistenie skutočného stredu laserovej čiary použijeme bod pred maximom odozvy x_1, y_1 , bod maxima x_2, y_2 a bod po maxime x_3, y_3 .



Obr. 4.21: Odozva na konvolúciu



Obr. 4.22: Detail odozvy

4.8.2 Maximum paraboly

Pomocou troch spomenutých bodov je možné nájsť parabolu, ktorá týmito bodmi prechádza. Rovnica paraboly:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.25)$$

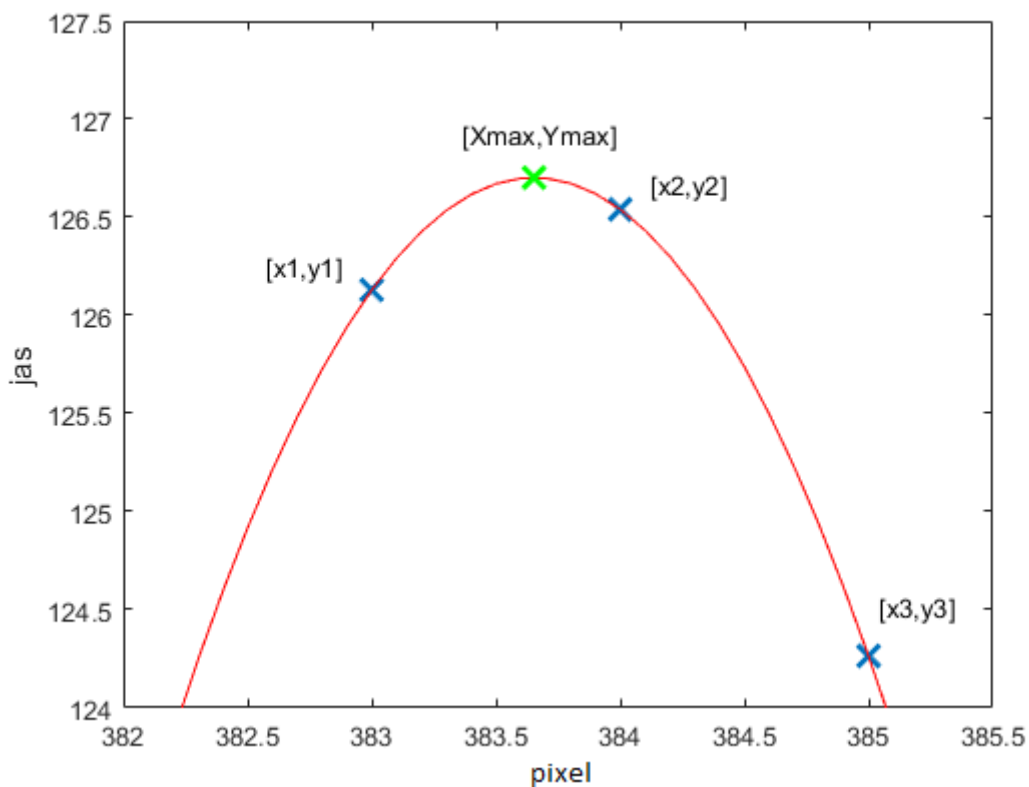
Vyriešením sústavy rovníc

$$\begin{aligned} y_1 &= ax_1^2 + bx_1 + c \\ y_2 &= ax_2^2 + bx_2 + c \\ y_3 &= ax_3^2 + bx_3 + c \end{aligned} \quad (4.26)$$

získame konštanty a, b, c hľadanej paraboly. Získané konštanty následne použijeme k nájdeniu maxima paraboly:

$$x_{max} = \frac{-b}{2a} \quad (4.27)$$

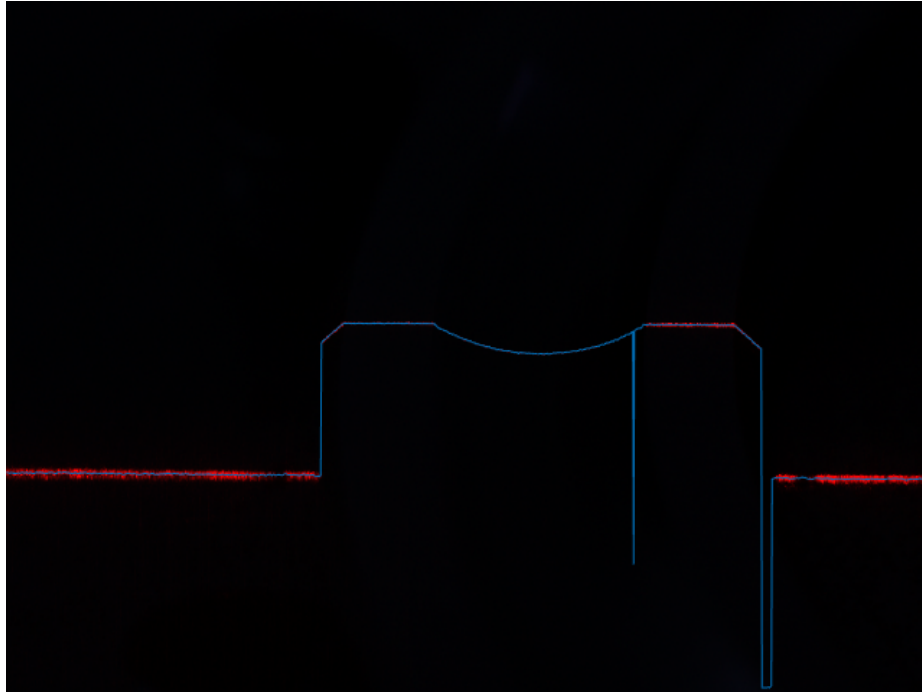
$$y_{max} = ax_{max}^2 + bx_{max} + c \quad (4.28)$$



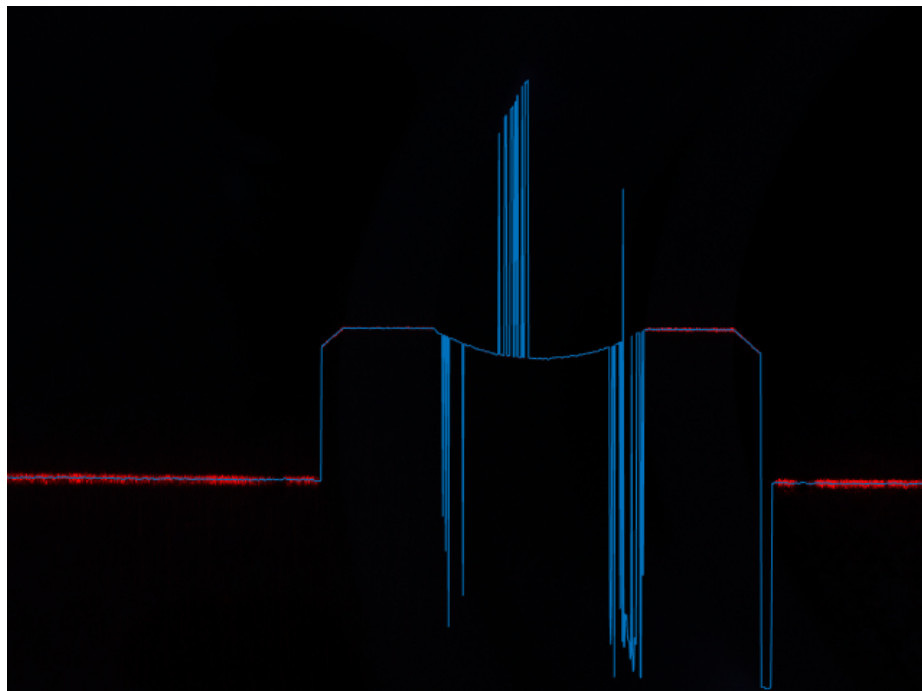
Obr. 4.23: Maximum na parabole

Po implementácii tohoto spôsobu prekladania bodov parabolou a hľadania jej maxima bolo vyskúšané ešte použitie metódy najmenších štvorcov pre určenie paraboly z viacerých bodov, dosahované výsledky však boli porovnateľné a bola použitá táto metóda.

Výsledná detekcia je zobrazená na obrázku 4.24. Na ďalšom obrázku je pre porovnanie zobrazená detekcia laseru, kde je ako kernel konvolúcie použitá obyčajná Gaussova krivka. Je vidieť, že kernel s invertovanou druhou deriváciou Gaussovej krivky je odolnejší voči šumu a dosahuje lepšie výsledky v miestach obežnej dráhy (miesta s nižšou intenzitou svetla laseru). Aj tak však v detekcii nastávajú chyby, tie sú však neskôr odstránené softvérovo.



Obr. 4.24: Detekcia laseru s invertovanou druhou deriváciou Gaussovej krivky ako jadrom konvolúcie



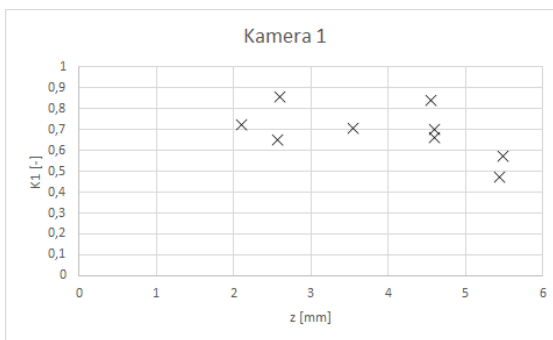
Obr. 4.25: Detekcia laseru s Gaussovou krivkou ako jadrom konvolúcie

4.9 Určenie konštant K_1 a K_2

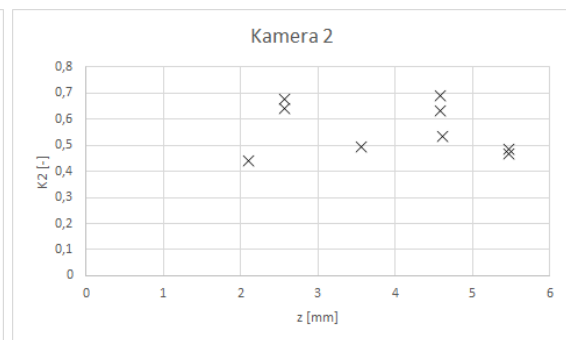
Pre úspešné potlačenie skreslenia merania olejovou vrstvou 4.3 je nutné určiť konštanty K_1 a K_2 , ktoré sú k výpočtu kompenzácie nutné. Ako bolo spomenuté, určenie konštant je možné pomocou výpočtu z uhlov a indexu lomu oleja (obtiazne), prípadne kalibráciou podľa 4.11.

V našom prípade bola k určeniu konštant použitá práve kalibrácia. Spočívala v nasnímaní referencie (bez oleja) a následne tej istej referencie, no tento krát so známou výškou olejovej vrstvy. Takýchto meraní bolo vykonaných niekoľko, aby sa zistilo, či sa konštanty skutočne správajú ako konštanty. Opakované merania boli vykonané pri rôznych vrstvách oleja a rôznych polohách v snímanej scéne.

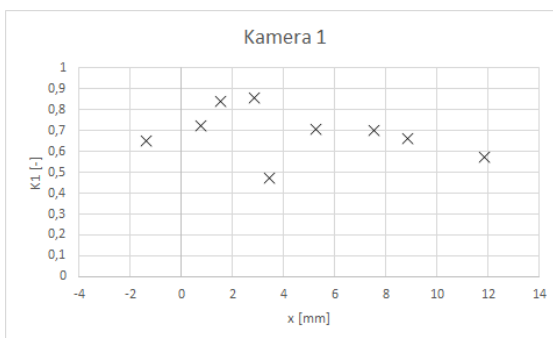
Nakoľko kompenzáciu vplyvu oleja vykonávame až po transformácii nameraných dát (laserovej čiary) z U, V súradníc do X, Z súradníc, konštanty musíme tiež určovať pre tento súradnicový systém, to znamená vyhodnocovať ich budeme na transformovaných dátach. V nasledujúcich grafoch je zobrazená závislosť K_1 a K_2 na polohe (závislé na pôvodnej polohe v obrazových súradniciach U, V a z toho plynúci predpoklad uvedený v závere kapitoly 4.3).



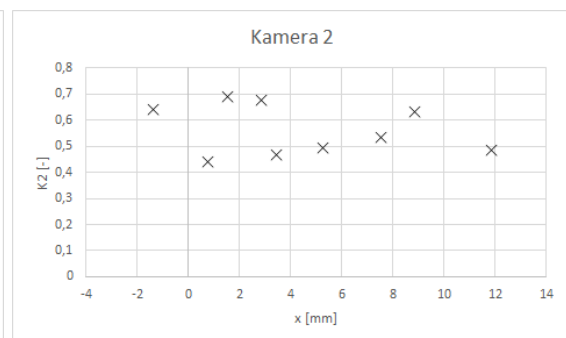
Obr. 4.26: Závislosť K_1 na súradnici z



Obr. 4.27: Závislosť K_2 na súradnici z

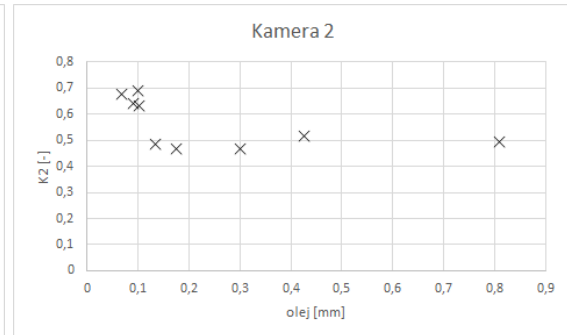
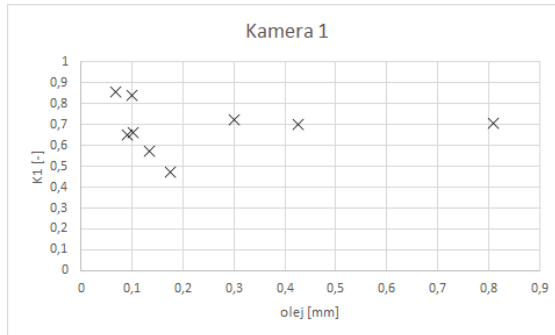


Obr. 4.28: Závislosť K_1 na súradnici x



Obr. 4.29: Závislosť K_2 na súradnici x

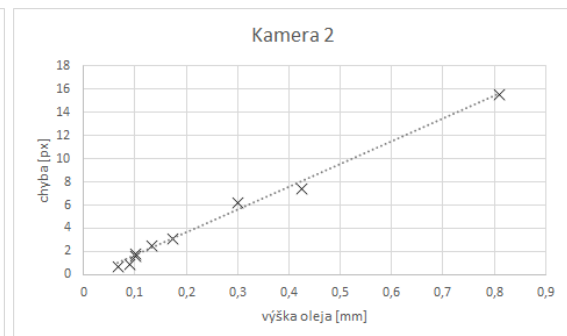
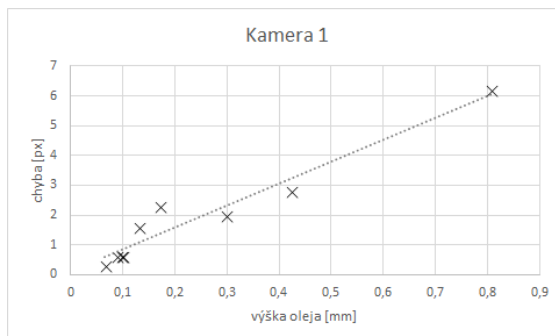
Na uvedených grafoch je vidieť, že K_1 a K_2 nemajú v zmeraných bodoch jasnú závislosť na súradniciach a chovajú sa v určitých medziach skôr "náhodne". Toto chovanie je objasnené v nasledujúcich dvoch grafoch, kde je vynesená závislosť K_1 a K_2 na výške oleja.



Obr. 4.30: Závislosť K_1 na vrstve oleja Obr. 4.31: Závislosť K_2 na vrstve oleja

K_1 a K_2 sa pri vykonaných meraniach začínajú chovať konštantne až od určitej výšky oleja. To je pravdepodobne spôsobené chybou merania kvôli nedostatočnému rozlíšeniu nášho meracieho systému pre veľmi nízke vrstvy oleja. Pri zvýšení rozlíšenia systému a použití ideálneho telecetrickeho objektívu sa dajú očakávať konštantné hodnoty K_1 a K_2 v celej scéne (celom snímku) a aj pri nízkych vrstvách oleja.

Ďalšie dva grafy ešte znázorňujú závislosť skreslenia obrazu z pohľadu jednotlivých kamier na výške olejovej vrstvy.



Obr. 4.32: Závislosť skreslenia z pohľadu kamery 1 na vrstve oleja

Obr. 4.33: Závislosť skreslenia z pohľadu kamery 2 na vrstve oleja

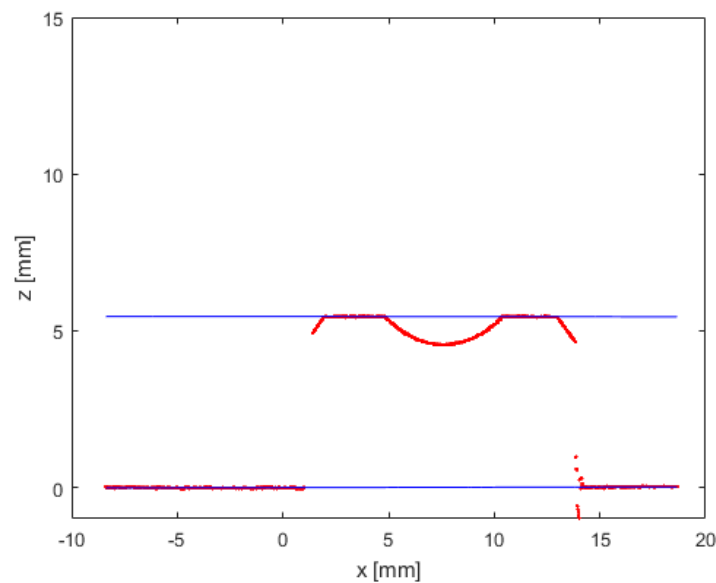
Podľa očakávaní je skreslenie z pohľadu kamery 2 (kamera s väčším uhlom voči laseru) väčšie (viď obrázok 4.6). Viditeľná je tiež lineárna závislosť medzi výškou vrstvy oleja a skreslením (chybou) v pixeloch.

4.10 Meranie parametrov

4.10.1 Meranie šírky ložiska

Algoritmus pre meranie šírky ložiskového krúžku (parameter B 1.1) po detekcii laserovej čiary a transformácii súradníc je nasledovný.

- body na podložke sa preložia priamkou (p). Za body na podložke prehlasujeme body, ktorých Z-ová súradnica je v blízkosti nuly v intervale ohraničenom prahom - ($-prah; 0; +prah$)
- rovnako sa priamkou (q) preložia body na rovných plochách vrchu profilu
- detekované priamky by mali byť ideálne rovnobežné, v praxi to tak však nikdy nedosiahneme. Preto nemôžeme vzdialenosť priamok spočítať klasickým spôsobom (kolmica od jednej priamky k ľubovoľnému bodu na druhej priamke). Spočítame teda vzdialenosti každých dvoch odpovedajúcich si bodov na priamkach p a q . Priemer týchto vzdialeností prehlásime za hľadanú šírku ložiska



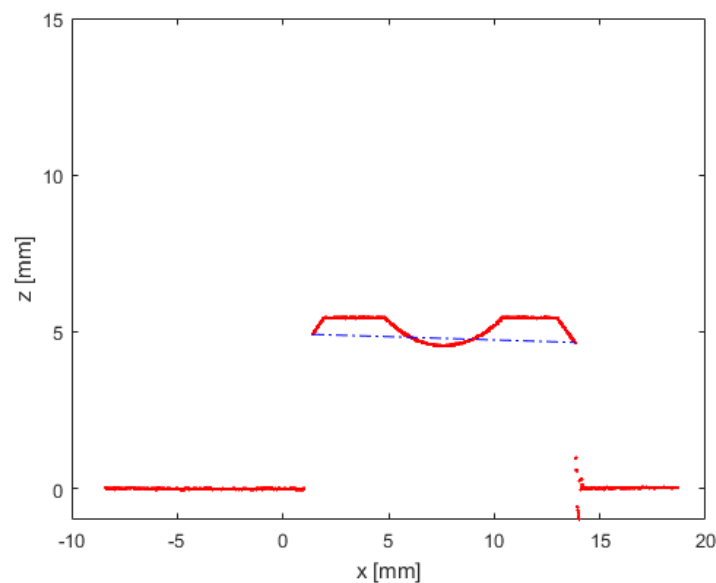
Obr. 4.34: Profil a podložka preložené priamkami

4.10.2 Meranie dĺžky profilu

Tento parameter 1.1 budeme používať k určeniu rozdielu medzi hriadelovým a priechodným krúžkom (viď príloha A). Výrobné tolerancie pri tomto parametre sa dajú vypočítať z tolerancií vonkajšieho a vnútorného priemeru. Nakoľko sú tieto tolerancie veľmi malé a opticky prakticky nemerateľné, bude nám bohato stačiť len

približná hodnota tohto parametru, ktorá nám zabezpečí rozdiel medzi priechodzím a hriadeľovým krúžkom daného typu ložiska (vždy 1 mm). Algoritmus sa k tomuto parametru dostáva v nasledujúcich krokoch:

- po detekcii a transformácii laserovej čiary sa vykoná filtrácia chybných bodov v detekovanej čiare
- hľadáme prvý a posledný bod na bodoch patriacich profilu (body s minimálnou a maximálnou X-ovou súradnicou)
- takto nájdené body označíme za hraničné body profilu
- spočítame euklidovskú vzdialenosť medzi týmito bodmi, ktorá nám udáva samotnú dĺžku profilu



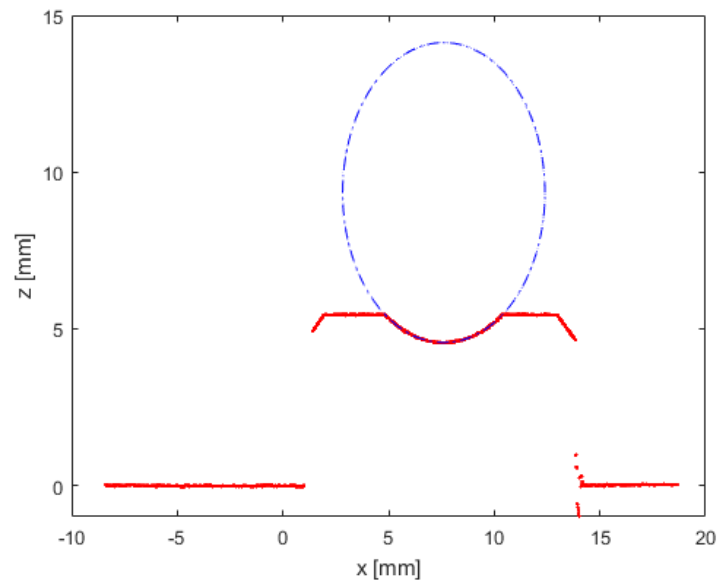
Obr. 4.35: Dĺžka profilu, vzdialenosť medzi prvým a posledným bodom profilu

4.10.3 Meranie polomeru obežnej dráhy

Polomer obežnej dráhy určujeme zo zmeraných bodov v oblasti kde by sa obežná dráha mala nachádzať - medzi rovnými plochami vrchu profilu .

- po detekcii a transformácii laserovej čiary sa vykoná filtrácia chybných bodov v detekovanej čiare
- body medzi rovnými plochami vrchu profilu nám slúžia ako referenčné body, ku ktorým sa snažíme napasovať ideálnu kružnicu
- použitá je optimalizačná metóda hľadania kružnice *Kasa* [10]. Táto metóda je založená na nelineárnej regresii

- výstup merania je polomer kružnice (obežnej dráhy) a prípadne aj súradnice stredu obežnej dráhy

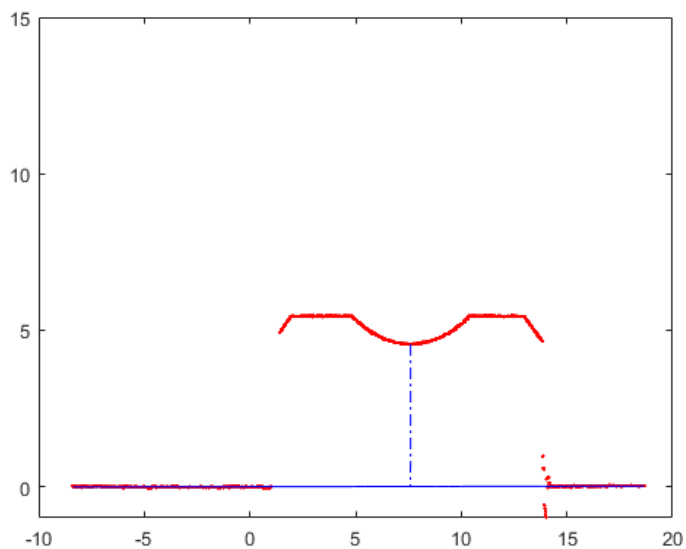


Obr. 4.36: Body patriace obežnej dráhe preložené kružnicou

4.10.4 Meranie hĺbky obežnej dráhy

Hĺbku obežnej dráhy získame pomocou dvoch už zmeraných parametrov - šírky ložiska a polomeru obežnej dráhy.

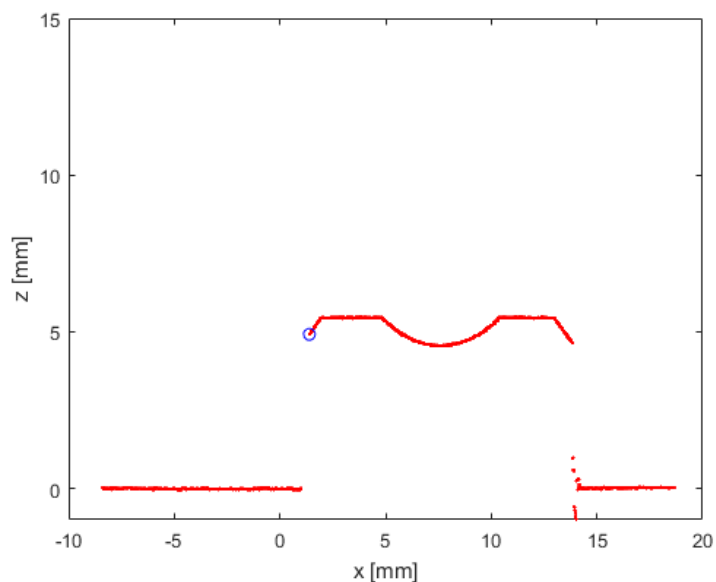
- nájdeme "najnižšie" položený bod na kružnici 4.10.3
- použijeme priamku ktorá prekladá body na podložke 4.10.1
- spočítame najkratšiu vzdialenosť od najnižšie položeného bodu kružnice k priamke (kolmica od priamky k bodu). Táto vzdialenosť predstavuje hĺbku obežnej dráhy



Obr. 4.37: Hĺbka obežnej dráhy

4.10.5 Meranie vonkajšieho priemeru

Meranie tohto parametru vychádza z popisu v kapitole 4.2. Jeho praktické prevedenie potom spočíva len v určení X-ovej súradnice prvého z bodov určených pri meraní dĺžky profilu.



Obr. 4.38: Prvý bod patriaci meranému profilu

4.10.6 Softvérové riešenie

Na softvérové riešenie tejto úlohy bolo použité programové prostredie Matlab. Riešenie je rozdelené do niekoľkých samostatných celkov (.m súborov), nakoľko celistvá aplikácia nebola medzi požiadavkami zadania práce.

Postup a algoritmus kalibrácie bol popísaný v kapitole 4.7. Kalibrácia je implementovaná v súbore *calibration.m*.

Detekcia laserovej čiary bola popísaná v kapitole 4.8. Algoritmus je implementovaný ako funkcia v m-file *laserFinder.m*

Pôvodným zámerom, pri meraní samotných parametrov bolo navrhnuť algoritmus, ktorému by sa predložila snímka (snímky) a meranie všetkých parametrov by prebehlo plne automaticky. Vyskytol sa však pomerne veľký problém so spoľahlivosťou detekovania a rozlišovania jednotlivých častí profilu (obežná dráha, vrchné plochy profilu, atď.) a to hlavne pri snímkach s ložiskami s vrstvou oleja. Od plne automatického merania sa teda upustilo a prešlo sa k riešeniu, kde sa "ručne" vyberú oblasti profilu ktoré nás zaujímajú, a nad získanými dátami následne prebehnú navrhnuté meracie algoritmy.

Meranie bez oleja

Prvé meranie bude nad ložiskami ktoré boli čisté - bez vrstvy konzervačného oleja. Pri tomto meraní sú použité 2 kamery rovnako ako pri meraní ložísk s vrstvou oleja. Rozlišovať medzi meraním čistých krúžkov a krúžkov s vrstvou oleja je v našom prípade nutné preto, lebo prípadné kompenzovanie vplyvu oleja na meraniach kde sa olej nenechádza, by do výsledku vnášalo zbytočnú chybu. Toto meranie je implementované v súbore *measure_clean.m*.

Vďaka tomu, že máme k dispozícii dve kamery, môžeme namerané parametre spresniť pomocou štatistických ukazovateľov (v našom prípade priemer, prípadne vážený priemer).

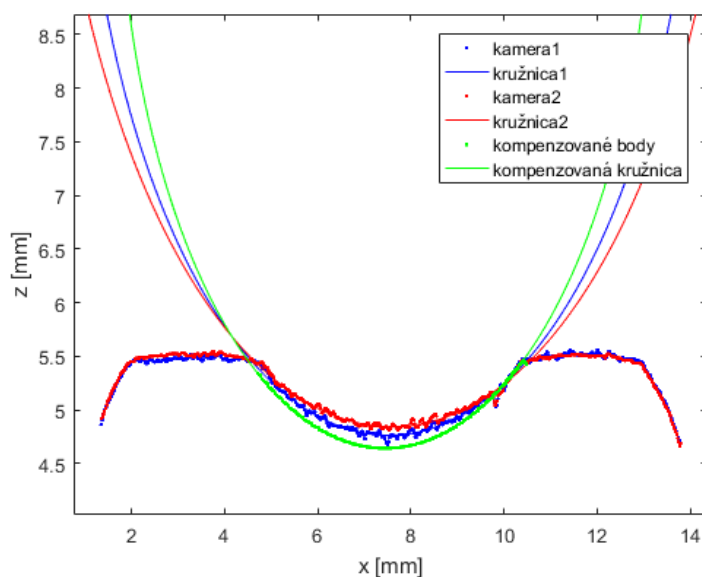
- podľa 4.10.1 sa určí šírka ložiska pre jednotlivé kamery. Výslednú šírku určujeme ako vážený priemer týchto dvoch meraní. Váhy sú v pomere 1:2 v prospech kamery 2 (kamera s väčším uhlom voči laseru), pretože táto kamera má približne dva krát väčšie rozlíšenie v osi Z
- rovnaký postup sa použije aj pri určovaní parametrov rádius obežnej dráhy a hĺbka obežnej dráhy
- ostatné parametre (dĺžka profilu a prvý bod profilu) sa vyhodnotia ako obyčajný priemer merania kamery 1 a kamery 2, pretože rozlíšenie v osi X majú obidve kamery rovnaký

Meranie s olejom

Meranie nad ložiskami s vrstvou oleja je implementované v m-file *measure_oil.m*. V tomto prípade sú už použité aj algoritmy na potlačenie chyby merania vychádzajúce z 4.3. Prvotný postup ručného výberu bodov na profile je zhodný s meraním bez oleja. Pri následnom vyhodnocovaní nameraných dát z oboch kamier boli použité dva prístupy.

Prvý prístup je podobný meraniu bez oleja.

- podľa 4.10.1 sa určí šírka ložiska pre jednotlivé kamery. Výslednú šírku určíme podľa vzťahu 4.9
- body patriace obežnej dráhe preložíme kružnicou (pri jednej aj druhej kamere). Body kružníc, ktoré sú v oblasti obežnej dráhy, opäť prepočítame podľa vzťahu 4.9. Nakoľko tieto výseky kružníc nie sú rovnako veľké (neobsahujú rovnaký počet bodov) a X-ové súradnice týchto bodov sa nemusia zhodovať, je použitý algoritmus, ktorý hľadá k jednej množine bodov najbližšie body (v X-ových súradniciach) z druhej množiny bodov (viď kód)
- takto prepočítané body znovu preložíme kružnicou a jej polomer označíme za správny polomer obežnej dráhy (obrázok 4.39). Najnižší bod tejto kružnice rovnako použijeme k určeniu parametra hĺbka obežnej dráhy



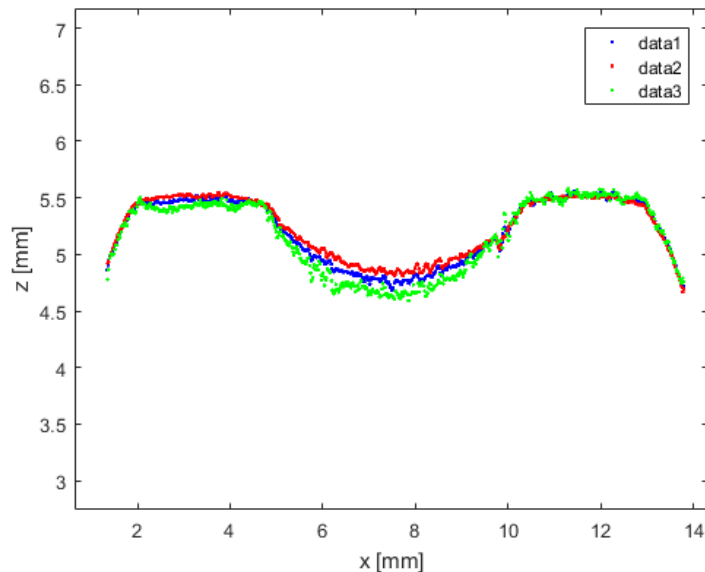
Obr. 4.39: Kompenzácia oleja v oblasti obežnej dráhy

- ostatné parametre (dĺžka profilu a prvý bod profilu) opäť vyhodnocujeme ako priemer merania kamery 1 a kamery 2. Skreslenie v osi X spôsobené olejom je

zanedbateľné v porovnaní s presnosťou, s ktorou potrebujeme tieto parametre určiť

Druhý prístup je nasledovný:

- profily z oboch kamier sa prepočítajú podľa vzťahu 4.9 a algoritmu, ktorý bol popísaný v prvom prístupe vyššie (viď obrázok 4.40)
- nad takto prepočítaným profilom sa následne vykonajú všetky merania rovnako ako boli popísané v postupe pre meranie ložisiek bez oleja



Obr. 4.40: Kompenzácia oleja meraním s dvomi kamerami. Modré body - kamera 1, červené - kamera 2, zelené - kompenzované

4.10.7 Vyhodnotenie meraní

Meranie bez oleja

Prvá časť vyhodnotenia bude porovnávať niekoľko zmeraných ložiskových krúžkov s meraniami týchto istých krúžkov pomocou profilometru scanCONTROL 2900-25/BL. Pomocou profilometru scanCONTROL 2900-25/BL boli vyhodnotené 3 parametre - šírka, hĺbka obežnej dráhy a dĺžka profilu. Náš merací systém vyhodnotil ešte ďalšie parametre, tým sa však budeme venovať až v ďalšej podkapitole.

krúžok	náš merací systém			scanCONTROL		
	šírka [mm]	hlbka OD [mm]	dĺžka [mm]	šírka [mm]	hlbka OD [mm]	dĺžka [mm]
51113ZKL5 hriad.	5,438	4,546	12,440	5,416	4,496	12,537
51113ZKL1 priech.	5,433	4,576	11,332	5,471	4,618	11,420
51205SKF4 priech.	4,531	3,504	9,823	4,540	3,517	9,941
51205SKF2 hriad.	4,549	3,534	10,904	4,558	3,532	11,016
51102FAG2 priech.	2,635	2,116	5,732	2,663	2,090	5,981
51102FAG3 priech.	2,643	2,110	5,927	2,657	2,094	5,998
51102ZKL3 priech.	2,579	2,097	5,934	2,591	2,069	5,981
51102ZKL5 priech.	2,572	2,103	6,482	2,592	2,101	6,514

Tab. 4.4: Porovnanie meraní s našim meracím systémom a profilometrom scanCONTROL

Keďže dáta z profilometru scanCONTROL sme použili ako kalibračné dáta pre náš systém, môžeme odchylky v meraniach považovať za chybu v našom meraní. Chyby aj so štatistickým vyhodnotením sú uvedené v nasledujúcej tabulke.

krúžok	absolútna chyba [mm]		
	šírka [mm]	hlbka OD [mm]	dĺžka [mm]
51113ZKL5 hriad.	0,022	0,050	0,097
51113ZKL1 priech.	0,038	0,042	0,088
51205SKF4 priech.	0,009	0,013	0,118
51205SKF2 hriad.	0,009	0,002	0,112
51102FAG2 priech.	0,028	0,026	0,249
51102FAG3 priech.	0,014	0,016	0,071
51102ZKL3 priech.	0,012	0,028	0,047
51102ZKL5 priech.	0,020	0,002	0,032
priemer	0,019	0,022	0,102
smerodajná odchylka	0,010	0,016	0,062

Tab. 4.5: Chyby merania

Priemerná absolútna chyba v šírke a hĺbke obežnej dráhy dosahuje hodnôt rozlíšenia nášho systému. Väčšia chyba pri parametri dĺžka profilu môže mať pôvod v nepresnej kalibrácii v osi X. Napriek vyššej chybe by sme však boli schopní rozlíšiť priechodzí krúžok od hriadelového.

Meranie s olejom

Pri meraniach s olejovou vrstvou boli použité konštanty $K_1=0,7$ a $K_2=0,5$ podľa 4.9. Namerané výsledky boli vyhodnocované porovnávaním s nameranými hodnotami na rovnakých ložiskách bez vrstvy oleja. Z toho vyplýva, že cieľom bolo po kompenzovaní vplyvu oleja získať výsledky čo najbližšie k výsledkom z meraní bez oleja. Vyššie boli popísané dva prístupy ku kompenzácii vplyvu oleja, vyhodnocované sú tak isto obidva prístupy.

Nasledujúca tabuľka obsahuje namerané parametre na vybraných ložiskových krúžkoch bez oleja.

krúžok	šírka [mm]	hlbka OD [mm]	dĺžka [mm]	polomer OD [mm]	prvý bod [mm]
51113ZKL5 hriad.	5,438	4,546	12,440	4,779	1,390
51113ZKL1 priech.	5,433	4,576	11,332	4,616	1,394
51205SKF4 priech.	4,531	3,504	9,823	4,354	-0,001
51205SKF2 hriad.	4,549	3,534	10,904	4,317	-0,015
51102FAG2 priech.	2,635	2,116	5,732	2,565	-2,387
51102FAG3 priech.	2,643	2,110	5,927	2,605	-2,364
51102ZKL3 priech.	2,579	2,097	5,934	2,558	-2,386
51102ZKL5 priech.	2,572	2,103	6,482	2,488	-2,394

Tab. 4.6: Meranie bez oleja

V ďalšej tabuľke sú výsledky merania podľa prvého prístupu, ktorý je popísaný v 4.10.6.

krúžok	šírka [mm]	hlbka OD [mm]	dĺžka [mm]	polomer OD [mm]	prvý bod [mm]
51113ZKL5 hriad.	5,429	4,622	12,440	5,648	1,348
51113ZKL1 priech.	5,445	4,657	11,272	5,540	1,708
51205SKF4 priech.	4,516	3,553	9,815	5,241	0,003
51205SKF2 hriad.	4,519	3,616	10,879	5,604	0,001
51102FAG2 priech.	2,707	2,119	5,960	2,793	-2,393
51102FAG3 priech.	2,699	2,145	5,941	2,525	-2,405
51102ZKL3 priech.	2,680	2,108	5,921	2,431	-2,381
51102ZKL5 priech.	2,641	2,156	6,505	2,629	-2,425

Tab. 4.7: Meranie s olejom, prístup 1

Odchylky medzi meraním bez oleja a skompenzovaným meraním s olejom aj so štatistickým vyhodnotením sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

krúžok	absolútna chyba [mm]				
	šírka [mm]	hĺbka OD [mm]	dĺžka [mm]	polomer OD [mm]	prvý bod [mm]
51113ZKL5 hriad.	0,009	0,076	0,000	0,869	0,042
51113ZKL1 priech.	0,012	0,081	0,060	0,924	0,314
51205SKF4 priech.	0,015	0,049	0,008	0,887	0,004
51205SKF2 hriad.	0,030	0,082	0,025	1,287	0,016
51102FAG2 priech.	0,072	0,003	0,228	0,228	0,006
51102FAG3 priech.	0,056	0,035	0,014	0,080	0,041
51102ZKL3 priech.	0,101	0,011	0,013	0,127	0,005
51102ZKL5 priech.	0,069	0,053	0,023	0,141	0,031
priemer	0,045	0,049	0,046	0,568	0,057
smerodajná odchylka	0,032	0,029	0,071	0,443	0,098

Tab. 4.8: Chyby merania, prístup 1

Pri meraní touto metódou sa pomerne dobre darilo zmerať šírku krúžku. Chyba pri tomto parametre narastala až pri najmenších meraných ložiskách (51102). To sa dalo čakať vzhľadom k tomu, že na týchto ložiskách nameriame menej bodov v porovnaní s väčšími ložiskami. Chyba v dĺžke profilu sa pohybovala pod hranicou rozlíšenia systému, v jednom prípade išlo zrejme o chybu iného pôvodu. Polomer a hĺbka obežnej dráhy sú pri kompenzácii vrstvy oleja nakritickejšie parametre. Odráža sa to aj na chybách - prekvapivé je však to, že chyby sú menšie práve pri malých ložiskách. Prvý bod profilu je závislý na správnosti zmerania dĺžky profilu, tým pádom je chyba pri tomto parametre podobne veľká.

Nasledujú výsledky merania podľa druhého prístupu, ktorý je popísaný v 4.10.6.

krúžok	šírka [mm]	hĺbka OD [mm]	dĺžka [mm]	polomer OD [mm]	prvý bod [mm]
51113ZKL5 hriad.	5,428	4,613	12,439	5,443	1,351
51113ZKL1 priech.	5,440	4,637	11,249	5,075	1,702
51205SKF4 priech.	4,516	3,516	9,765	4,593	0,005
51205SKF2 hriad.	4,512	3,554	10,812	3,979	-0,003
51102FAG2 priech.	2,705	2,090	5,999	2,326	-2,380
51102FAG3 priech.	2,721	2,094	6,001	1,781	-2,398
51102ZKL3 priech.	2,669	2,071	5,978	1,867	-2,375
51102ZKL5 priech.	2,624	1,983	6,508	1,233	-2,425

Tab. 4.9: Meranie s olejom, prístup 2

Odchylky medzi meraním bez oleja a skompenzovaným meraním s olejom druhým prístupom aj so štatistickým vyhodnotením sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

krúžok	absolútna chyba [mm]				
	šírka [mm]	hĺbka OD [mm]	dĺžka [mm]	polomer OD [mm]	prvý bod [mm]
51113ZKL5 hriad.	0,010	0,067	0,001	0,664	0,039
51113ZKL1 priech.	0,007	0,061	0,083	0,459	0,308
51205SKF4 priech.	0,015	0,012	0,058	0,239	0,006
51205SKF2 hriad.	0,037	0,020	0,092	0,338	0,012
51102FAG2 priech.	0,070	0,026	0,267	0,239	0,007
51102FAG3 priech.	0,078	0,016	0,074	0,824	0,034
51102ZKL3 priech.	0,090	0,026	0,044	0,691	0,011
51102ZKL5 priech.	0,052	0,120	0,026	1,265	0,031
priemer	0,045	0,044	0,081	0,590	0,056
smerodajná odchylka	0,030	0,035	0,076	0,327	0,096

Tab. 4.10: Chyby merania, prístup 2

Výsledky dosiahnuté meraním týmto spôsobom sú podobné predchádzajúcemu spôsobu. Za zmienku stojí lepšia úspešnosť pri meraní polomeru (okrem jedného prípadu) a to ako pri malých, tak aj pri väčších ložiskách.

Pri meraní jednoduchších parametrov (šírka, dĺžka) dosahujú obidva prístupy relatívne dobré výsledky. Meranie prvého bodu profilu (meranie vonkajšieho priemeru) môže byť silne zatažené chybou vzniknutou nesprávnym uložením ložiska do zarážok. Pri meraní náročnejších parametrov (obežná dráha), kde je nutná rekonštrukcia kružnice, je úspešnosť horšia. Toto je silne ovplyvnené niekoľkými faktormi.

Ako bolo spomenuté v 4.3, pre túto úlohu by bol vhodný telecentrický objektív. Boli by tým potlačené nelinearity, ktoré do systému vnáša jednoduchý endocentrický objektív a tým pádom by konštanty K_1 a K_2 boli skutočne konštantné v celej snímke. Rovnako by bolo vhodné použiť čip s väčším rozlíšením kvôli presnejšiemu meraniu na malých vrstvách oleja 4.9. V neposlednom rade by pomohol objektív s väčšou hĺbkou ostrosti (zabezpečenie podobnej ostrosti pri úzkych aj širokých ložiskách), prípadne laser s užšou, jednoduchšie detekovatelnou stopu.

5 ZÁVER

Práca sa zaoberala aktívnou optickou trianguláciou a jej využitím pri meraní parametrov axiálnych ložísk.

Po predstavení rôznych metód zamedzovania miešania rôznych typov a prevedení ložiskových krúžkov, bola ako najschopnejšia určená práve metóda aktívnej optickej triangulácie.

Boli vyskúšané tri rôzne komerčné snímače, ktoré by mohli byť vhodné k riešeniu tejto úlohy. Nakoniec sa ako jediný teoreticky vhodný z tejto trojice ukázal snímač scanCONTROL 2900-25 BL od firmy Micro-epsilon. Nakoniec však bol aj tento snímač vylúčený, pretože samotný nedokázal riešiť chybu merania vzniknutú lomom svetla na vrstve konzervačného oleja.

Ďalšia práca sa potom venovala výlučne vlastnému návrhu profilometra. Zostavená bola meracia stanica pozostávajúca z dvoch snímačov (kamier). Takéto zostavenie by malo byť schopné potlačiť už spomenutú chybu (viď kapitola 4.3).

Pri algoritme detekcie laserovej čiary bola použitá konvolúcia vstupného obrazu s druhou deriváciou Gaussovej priamky. Tento spôsob umožňuje robustnú detekciu laseru so subpixelovou presnosťou.

Navrhnutá bola metóda kalibrácie takéhoto systému. Kalibrácia bola oproti tradičným prístupom mierne nekonvenčná. Nakoľko nebol k dispozícii vhodný a presný kalibračný predmet a jeho výroba nebola v našich časových možnostiach, použili sa ku kalibrácii práve skúmané ložiskové krúžky. Tieto krúžky boli zmerané pomocou už spomenutého profilometru scanCONTROL 2900-25 BL a kalibrácia následne prebiehala na základe dát z tohto snímača.

Samotný kalibračný algoritmus bol (ako aj ostatné softvérové časti) implementovaný v programovom prostredí Matlab. Použitá bola metóda spätnej transformácie kalibračných bodov, vďaka ktorej je možné odhaliť chyby v kalibrácii a kalibráciu následne spresniť.

Po kalibrácii bolo následne možné prejsť ku samotnej meracej úlohe. Meranie bolo rozdelené na dva celky - meranie na čistých ložiskách (bez prítomnosti oleja) a meranie na ložiskách pokrytých olejom, v oboch prípadoch sa využíval celý merací systém - dve kamery. Samotné meranie pozostávalo z pomerne jednoduchých matematických úloh - preloženie bodov priamkou, počítanie euklidovských vzdialeností a podobne.

V prípade merania bez prítomnosti oleja boli údaje namerané jednotlivými kamerami vyhodnotené štatisticky (priemer a vážený priemer). Vážený priemer bol použitý v prípade, keď v meranom parametri hrala úlohu Z-ová súradnica, v ktorej mala jedna z kamier lepšie rozlíšenie. Meranie bolo vyhodnotené na základe porovnania s meraním pomocou profilometru scanCONTROL 2900-25 BL. Keďže dáta z

tohto profilometru boli použité ku kalibrácii, bolo možné parametre ním zmerané považovať za referenčné. V dvoch z troch meraných parametrov dosahoval náš systém chybu menšiu než bolo rozlíšenie systému. Tretí meraný parameter bol zrejme zatažený chybou pri kalibrácii.

V prípade merania na ložiskách s vrstvou oleja sa vychádzalo z navrhutej metódy potlačenia vplyvu oleja. Vyskúšané potom boli dve implementácie tejto metódy. Obidve dosahovali dobrú úspešnosť v meraní parametrov šírka krúžku, dĺžka profilu, prípadne prvý bod profilu (z ktorého je následne možné určiť vonkajší priemer ložiska). Horšie to bolo s úspešnosťou pri meraní parametrov spojených s obežnou dráhou (rádius a hĺbka). Merania boli porovnávané s meraniami bez prítomnosti oleja. Možné príčiny horších výsledkov sú zhrnuté na konci kapitoly 4.10.7.

Navrhnutá metóda v potlačenia vplyvu lomu svetla predostiera riešenie problému, ktorému zatiaľ nebolo v technickej praxi venované veľa pozornosti a v tom spočíva hlavný prínos tejto práce.

LITERATÚRA

- [1] *Návrh možností automatizace a monitoringu montážních procesů*. Brno: VUT v Brně, FEKT, UAMT, 2017, 45 stran
- [2] *Automatizace, měření a monitoring montážních procesů*. 10 stran. Klášterec nad Ohří: ZKL Klášterec nad Ohří, a.s., 2017.
- [3] Ing. Kalová Ilona, Ing. Horák Karel *Optické metody měření 3D objektů*. Brno: VUT v Brně, FEKT, UAMT, 2005. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>>
- [4] *scanCONTROL 2D/3D laser scanner (laser profile sensors)*. Ortenburg/Germany: MICRO-EPSILON MESSTECHNIK
- [5] *Operating instructions. PosCon HM*. Frauenfeld/Switzerland: Baumer Electric AG, 2015
- [6] *Instruction Manual scanCONTROL 29xx/BL* Ortenburg/Germany: MICRO-EPSILON MESSTECHNIK, 2008
- [7] *DFK 41BU02 USB 2.0 color industrial camera*. Dostupné z URL: <<https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-2.0-color/dfk41bu02/>>
- [8] *MFA1-230-5M35*. Dostupné z URL: <http://www.prumysloveobjektivy.cz/files/products/1547/MFA1_230_5M35_Datasheet.pdf>
- [9] *Telecentrický objektiv - přednosti a charakteristiky*. Dostupné z URL: <http://www.prumysloveobjektivy.cz/app/webroot/files/clanky/endocentricky_vs_telecentricky.png>
- [10] I. Kasa *A circle fitting procedure and its error analysis*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1976.

ZOZNAM PRÍLOH

A Parametre ložísk

70

A PARAMETRE LOŽÍSK

TPRM	VÝROBNÍ NÁVODKA			VÝROBNÍ NÁVODKA			VÝROBNÍ NÁVODKA			VÝROBNÍ NÁVODKA			PROFIL		
	ŠÍŘKA	TOL -	ØD	HORNÍ TOL	DOLNÍ TOL	Øob dráh	TOL. PRŮMĚ	HLOUBKA OD	HORNÍ	DOLNÍ	RADIUS ob dr	Ød		HORNÍ TOL	DOLNÍ TOL
51100 A / 06	2,6	-0,05	24	-0,001	-0,010	17	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	10	-0,001	-0,007	7
51100 A / 07	2,6	-0,05	24	-0,001	-0,010	17	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	11	0,1	0	6,5
51100 FAG, S	2,7	-0,05	24	-0,001	-0,010	17	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	10	-0,001	-0,007	7
51100 FAG, S	2,7	-0,05	24	-0,001	-0,010	17	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	11	0,1	0	6,5
51101 A / 06	2,6	-0,05	26	-0,001	-0,010	19	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	12	-0,001	-0,007	7
51101 A / 07	2,6	-0,05	26	-0,001	-0,010	19	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	13	0,15	0	6,5
51101 FAG, S	2,7	-0,05	26	-0,001	-0,010	19	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	12	-0,001	-0,007	7
51101 FAG, S	2,7	-0,05	26	-0,001	-0,010	19	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	13	0,15	0	6,5
51102 A / 06	2,6	-0,05	28	-0,001	-0,010	21,5	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	15	-0,001	-0,007	6,5
51102 A / 07	2,6	-0,05	28	-0,001	-0,010	21,5	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	16	0,15	0	6
51102 FAG, S	2,7	-0,05	28	-0,001	-0,010	21,5	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	15	-0,001	-0,007	6,5
51102 FAG, S	2,7	-0,05	28	-0,001	-0,010	21,5	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	16	0,15	0	6
51103 A / 06	2,6	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	17	-0,001	-0,007	6,5
51103 A / 07	2,6	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,101	0	-0,03	R2,59±0,04	18	0,15	0	6
51103 AH01 /	2,7	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,119	0,007	-0,004	R2,57±0,025	17	-0,001	-0,007	6,5
51103 AH01 /	2,7	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,119	0,007	-0,004	R2,57±0,025	18	0,15	0	6
51103 FAG, S	2,7	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	17	-0,001	-0,007	6,5
51103 FAG, S	2,7	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,119	0	-0,03	R2,57±0,025	18	0,15	0	6
51103 H / 06	2,6	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,101	0,027	0,012	R2,59±0,04	17	-0,001	-0,007	6,5
51103 H / 07	2,6	-0,05	30	-0,001	-0,010	23,5	±0,02	2,101	0,027	0,012	R2,59±0,04	18	0,1	0	6
51104 A / 06	2,8	-0,05	35	-0,001	-0,013	27,5	±0,02	2,205	0	-0,03	R3,01±0,04	20	-0,001	-0,008	7,5
51104 A / 07	2,8	-0,05	35	-0,001	-0,013	27,5	±0,02	2,205	0	-0,03	R3,01±0,04	21	0,15	0	7
51104 FAG, S	3	-0,05	35	-0,001	-0,013	27,5	±0,02	2,222	0	-0,03	R3±0,03	20	-0,001	-0,008	7,5
51104 FAG, S	3	-0,05	35	-0,001	-0,013	27,5	±0,02	2,222	0	-0,03	R3±0,03	21	0,15	0	7
51105 A / 06	3,1	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,483	0	-0,03	R3,25±0,04	25	-0,001	-0,008	8,5
51105 A / 07	3,1	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,483	0	-0,03	R3,25±0,04	26,3	0,05	-0,05	7,875
51105 AH01 /	3,3	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,5	0,007	-0,004	R3,24±0,03	25	-0,001	-0,008	8,5
51105 AH01 /	3,3	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,5	0,007	-0,004	R3,24±0,03	26,2	0,1	0	7,9
51105 FAG, S	3,3	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,5	0	-0,03	R3,24±0,03	25	-0,001	-0,008	8,5
51105 FAG, S	3,3	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,5	0	-0,03	R3,24±0,03	26,3	0,05	-0,05	7,875
51105 H / 06	3,1	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,483	0,027	0,012	R3,25±0,04	25	-0,001	-0,008	8,5
51105 H / 07	3,1	-0,05	42	-0,001	-0,013	33,5	±0,02	2,483	0,027	0,012	R3,25±0,04	26	0,1	0	8
51106 A / 06	3,1	-0,05	47	-0,001	-0,013	38,5	±0,02	2,483	0	-0,03	R3,25±0,04	30	-0,001	-0,008	8,5
51106 A / 07	3,1	-0,05	47	-0,001	-0,013	38,5	±0,02	2,483	0	-0,03	R3,25±0,04	32	0,15	0	7,5
51106 FAG, S	3,3	-0,05	47	-0,001	-0,013	38,5	±0,02	2,5	0	-0,03	R3,24±0,03	30	-0,001	-0,008	8,5
51106 FAG, S	3,3	-0,05	47	-0,001	-0,013	38,5	±0,02	2,5	0	-0,03	R3,24±0,03	32	0,15	0	7,5
51107 A / 06	3,6	-0,05	52	-0,002	-0,015	43,5	±0,03	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	35	-0,001	-0,01	8,5
51107 A / 07	3,6	-0,05	52	-0,002	-0,015	43,5	±0,03	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	37	0,15	0	7,5
51107 FAG, S	3,8	-0,05	52	-0,002	-0,015	44	±0,03	3	0	-0,03	R3,24±0,03	35	-0,001	-0,01	8,5
51107 FAG, S	3,8	-0,05	52	-0,002	-0,015	44	±0,03	3	0	-0,03	R3,24±0,03	37	0,15	0	7,5
51108 A / 06	3,6	-0,05	60	-0,002	-0,015	50	±0,03	2,911	0	-0,03	R3,86±0,04	40	-0,001	-0,01	10
51108 A / 07	3,6	-0,05	60	-0,002	-0,015	50	±0,03	2,911	0	-0,03	R3,86±0,04	42	0,15	0	9
51108 FAG, S	3,9	-0,05	60	-0,002	-0,015	50	±0,03	2,928	0	-0,03	R3,86±0,03	40	-0,001	-0,01	10
51108 FAG, S	3,9	-0,05	60	-0,002	-0,015	50	±0,03	2,928	0	-0,03	R3,86±0,03	42	0,15	0	9
51109 A / 06	4,1	-0,05	65	-0,002	-0,015	55	±0,03	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	45	-0,001	-0,01	10
51109 A / 07	4,1	-0,05	65	-0,002	-0,015	55	±0,03	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	47	0,15	0	9
51109 FAG, S	4,3	-0,05	65	-0,002	-0,015	55	±0,03	3,428	0	-0,03	R3,86±0,03	45	-0,001	-0,01	10
51109 FAG, S	4,3	-0,05	65	-0,002	-0,015	55	±0,03	3,428	0	-0,03	R3,86±0,03	47	0,15	0	9
51110 A / 06	4,1	-0,05	70	-0,002	-0,015	60	±0,03	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	50	-0,001	-0,01	10
51110 A / 07	4,1	-0,05	70	-0,002	-0,015	60	±0,03	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	52	0,2	0	9
51110 FAG, S	4,3	-0,05	70	-0,002	-0,015	60	±0,03	3,428	0	-0,03	R3,86±0,03	50	-0,001	-0,01	10
51110 FAG, S	4,3	-0,05	70	-0,002	-0,015	60	±0,03	3,428	0	-0,03	R3,86±0,03	52	0,2	0	9
51111 A / 06	4,8	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4,014	0	-0,03	R4,29±0,04	55	-0,002	-0,012	11,5

51111 A / 07	4,8	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4,014	0	-0,03	R4,29±0,04	57	0,2	0	10,5
51111 AH01 /	4,9	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4	0,007	-0,004	R4,32±0,035	55	-0,002	-0,012	11,5
51111 AH01 /	4,9	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4	0,007	-0,004	R4,32±0,035	57	0,2	0	10,5
51111 FAG, S	4,9	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4	0	-0,03	R4,32±0,035	55	-0,001	-0,012	11,5
51111 FAG, S	4,9	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4	0	-0,03	R4,32±0,035	57	0,2	0	10,5
51111 H / 06	4,8	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4,014	0,027	0,012	R4,29±0,04	55	-0,001	-0,012	11,5
51111 H / 07	4,8	-0,05	78	-0,002	-0,015	66,5	±0,03	4,014	0,027	0,012	R4,29±0,04	57	0,15	0	10,5
51112 A / 06	5	-0,05	85	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	4,117	0	-0,03	R4,72±0,04	60	-0,002	-0,012	12,5
51112 A / 07	5	-0,05	85	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	4,117	0	-0,03	R4,72±0,04	62	0,2	0	11,5
51112 FAG, S	5,3	-0,05	85	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	4,135	0	-0,03	R4,71±0,03	60	-0,002	-0,012	12,5
51112 FAG, S	5,3	-0,05	85	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	4,135	0	-0,03	R4,71±0,03	62	0,2	0	11,5
51113 A / 06	5,5	-0,05	90	-0,002	-0,018	77,5	±0,03	4,617	0	-0,03	R4,72±0,04	65	-0,002	-0,012	12,5
51113 A / 07	5,5	-0,05	90	-0,002	-0,018	77,5	±0,03	4,617	0	-0,03	R4,72±0,04	67	0,2	0	11,5
51113 FAG, S	5,6	-0,05	90	-0,002	-0,018	77,5	±0,03	4,5	0	-0,03	R4,86±0,035	65	-0,002	-0,012	12,5
51113 FAG, S	5,6	-0,05	90	-0,002	-0,018	77,5	±0,03	4,5	0	-0,03	R4,86±0,035	67	0,2	0	11,5
51114 A / 06	5,5	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,617	0	-0,03	R4,72±0,04	70	-0,002	-0,012	12,5
51114 A / 07	5,5	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,617	0	-0,03	R4,72±0,04	72	0,2	0	11,5
51114 AH01 /	5,6	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,5	0,007	-0,004	R4,86±0,035	70	-0,002	-0,012	12,5
51114 AH01 /	5,6	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,5	0,007	-0,004	R4,86±0,035	72	0,2	0	11,5
51114 FAG, S	5,6	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,5	0	-0,03	R4,86±0,035	70	-0,002	-0,012	12,5
51114 FAG, S	5,6	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,5	0	-0,03	R4,86±0,035	72	0,15	0	11,5
51114 H / 06	5,5	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,617	0,027	0,012	R4,72±0,04	70	-0,002	-0,012	12,5
51114 H / 07	5,5	-0,05	95	-0,002	-0,018	82,5	±0,03	4,617	0,027	0,012	R4,72±0,04	72	0,2	0	11,5
51115 A / 06	6	-0,05	100	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	75	-0,002	-0,012	12,5
51115 A / 07	6	-0,05	100	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	77	0,2	0	11,5
51115 FAG, S	5,9	-0,05	100	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	75	-0,002	-0,012	12,5
51115 FAG, S	5,9	-0,05	100	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	77	0,2	0	11,5
51116 A / 06	6	-0,05	105	-0,002	-0,018	92,5	±0,03	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	80	-0,002	-0,012	12,5
51116 A / 07	6	-0,05	105	-0,002	-0,018	92,5	±0,03	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	82	0,2	0	11,5
51116 FAG, S	5,9	-0,05	105	-0,002	-0,018	92,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	80	-0,002	-0,012	12,5
51116 FAG, S	5,9	-0,05	105	-0,002	-0,018	92,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	82	0,2	0	11,5
51117 A / 06	6	-0,06	110	-0,002	-0,018	97,5	±0,04	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	85	-0,002	-0,012	12,5
51117 A / 07	6	-0,06	110	-0,002	-0,018	97,5	±0,04	5,117	0	-0,03	R4,72±0,04	87	0,2	0	11,5
51117 FAG, S	5,9	-0,06	110	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	85	-0,002	-0,016	12,5
51117 FAG, S	5,9	-0,06	110	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	4,738	0	-0,03	R5,14±0,04	87	0,2	0	11,5
51118 A / 06	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0	-0,03	R5,57±0,05	90	-0,002	-0,016	15
51118 A / 07	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0	-0,03	R5,57±0,05	92	0,2	0	14
51118 FAG / C	7,3	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	6,238	0	-0,03	R5,14±0,04	90	-0,002	-0,016	15
51118 FAG / C	7,3	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	6,238	0	-0,03	R5,14±0,04	92	0,2	0	14
51118 H / 06	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0,028	0,015	R5,57±0,05	90	-0,002	-0,016	15
51118 H / 07	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0,028	0,015	R5,57±0,05	92	0,2	0	14
51118 SKF / C	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0	-0,03	R5,57±0,05	90	-0,002	-0,016	15
51118 SKF / C	6,9	-0,06	120	-0,002	-0,018	105	±0,04	5,823	0	-0,03	R5,57±0,05	92	0,2	0	14
51202 A / 06	3,6	-0,05	32	-0,001	-0,013	23,5	±0,02	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	15	-0,001	-0,007	8,5
51202 A / 07	3,6	-0,05	32	-0,001	-0,013	23,5	±0,02	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	17	0,15	0	7,5
51202 FAG, S	3,7	-0,05	32	-0,001	-0,013	23,5	±0,02	2,825	0	-0,03	R3,43±0,03	15	-0,001	-0,007	8,5
51202 FAG, S	3,7	-0,05	32	-0,001	-0,013	23,5	±0,02	2,825	0	-0,03	R3,43±0,03	17	0,15	0	7,5
51203 A / 06	3,6	-0,05	35	-0,001	-0,013	26	±0,02	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	17	-0,001	-0,007	9
51203 A / 07	3,6	-0,05	35	-0,001	-0,013	26	±0,02	2,983	0	-0,03	R3,25±0,04	19	0,15	0	8
51203 FAG, S	3,7	-0,05	35	-0,001	-0,013	26	±0,02	2,825	0	-0,03	R3,43±0,03	17	-0,001	-0,007	9
51203 FAG, S	3,7	-0,05	35	-0,001	-0,013	26	±0,02	2,825	0	-0,03	R3,43±0,03	19	0,15	0	8
51204 A / 06	4,2	-0,05	40	-0,001	-0,013	30	±0,02	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	20	-0,001	-0,008	10
51204 A / 07	4,2	-0,05	40	-0,001	-0,013	30	±0,02	3,411	0	-0,03	R3,86±0,04	22	0,15	0	9
51204 FAG, S	4,4	-0,05	40	-0,001	-0,013	30	±0,02	3,428	0	-0,02	R3,86±0,03	20	-0,001	-0,008	10
51204 FAG, S	4,4	-0,05	40	-0,001	-0,013	30	±0,02	3,428	0	-0,02	R3,86±0,03	22	0,15	0	9

51205 A / 06	4,3	-0,05	47	-0,001	-0,013	36	±0,02	3,514	0	-0,03	R4,29±0,04	25	-0,001	-0,008	11
51205 A / 07	4,3	-0,05	47	-0,001	-0,013	36	±0,02	3,514	0	-0,03	R4,29±0,04	27	0,15	0	10
51205 FAG, S	4,6	-0,05	47	-0,001	-0,013	36	±0,02	3,531	0	-0,03	R4,29±0,02	25	-0,001	-0,008	11
51205 FAG, S	4,6	-0,05	47	-0,001	-0,013	36	±0,02	3,531	0	-0,03	R4,29±0,02	27	0,15	0	10
51206 A / 06	4,8	-0,05	52	-0,002	-0,015	41	±0,02	4,014	0	-0,03	R4,29±0,04	30	-0,001	-0,008	11
51206 A / 07	4,8	-0,05	52	-0,002	-0,015	41	±0,02	4,014	0	-0,03	R4,29±0,04	32	0,15	0	10
51206 FAG, S	5	-0,05	52	-0,002	-0,015	41,5	±0,02	4,031	0	-0,02	R4,28±0,03	30	-0,001	-0,008	11
51206 FAG, S	5	-0,05	52	-0,002	-0,015	41,5	±0,02	4,031	0	-0,02	R4,28±0,03	32	0,15	0	10
51208 A / 06	5,5	-0,04	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,483	0	-0,03	R5,4±0,05	40	-0,001	-0,01	14
51208 A / 07	5,5	-0,04	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,483	0	-0,03	R5,4±0,05	42	0,15	0	13
51208 AH01 /	5,7	-0,05	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,341	0,007	-0,004	R5,58±0,04	40	-0,001	-0,01	14
51208 AH01 /	5,7	-0,05	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,341	0,007	-0,004	R5,58±0,04	42	0,15	0	13
51208 FAG, S	5,7	-0,05	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,341	0	-0,02	R5,58±0,04	40	-0,001	-0,01	14
51208 FAG, S	5,7	-0,05	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,341	0	-0,02	R5,58±0,04	42	0,15	0	13
51208 H / 06	5,5	-0,04	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,483	0,027	0,012	R5,4±0,05	40	-0,001	-0,01	14
51208 H / 07	5,5	-0,04	68	-0,002	-0,015	54	±0,03	4,483	0,027	0,012	R5,4±0,05	42	0,15	0	13
51210 A / 06	7	-0,04	78	-0,002	-0,015	64	±0,03	5,983	0	-0,03	R5,4±0,05	50	-0,001	-0,01	14
51210 A / 07	7	-0,04	78	-0,002	-0,015	64	±0,03	5,983	0	-0,03	R5,4±0,05	52	0,2	0	13
51210 FAG, S	6,6	-0,05	78	-0,002	-0,015	64	±0,03	5,444	0	-0,03	R6±0,04	50	-0,001	-0,01	14
51210 FAG, S	6,6	-0,05	78	-0,002	-0,015	64	±0,03	5,444	0	-0,03	R6±0,04	52	0,2	0	13
51211 A / 06	7,4	-0,05	90	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	6,133	0	-0,03	R6,86±0,045	55	-0,002	-0,012	17,5
51211 A / 07	7,4	-0,05	90	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	6,133	0	-0,03	R6,86±0,045	57	0,2	0	16,5
51211 FAG, S	7,5	-0,05	90	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	6,25	0	-0,03	R6,76±0,045	55	-0,002	-0,012	17,5
51211 FAG, S	7,5	-0,05	90	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	6,25	0	-0,03	R6,76±0,045	57	0,2	0	16,5
51216 A / 06	8,9	-0,05	115	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	7,633	0	-0,04	R6,86±0,045	80	-0,002	-0,012	17,5
51216 A / 07	8,9	-0,05	115	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	7,633	0	-0,04	R6,86±0,045	82	0,2	0	16,5
51216 FAG, S	8,8	-0,05	115	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	7,253	0	-0,03	R7,28±0,045	80	-0,002	-0,012	17,5
51216 FAG, S	8,8	-0,05	115	-0,002	-0,018	97,5	±0,03	7,253	0	-0,03	R7,28±0,045	82	0,2	0	16,5
51217 A / 06	9,8	-0,06	125	-0,002	-0,021	105	±0,04	8,339	0	-0,04	R7,72±0,03	85	-0,002	-0,016	20
51217 A / 07	9,8	-0,06	125	-0,002	-0,021	105	±0,04	8,339	0	-0,04	R7,72±0,03	88	0,2	0	18,5
51217 FAG, S	9,3	-0,06	125	-0,002	-0,021	105	±0,04	7,75	0	-0,03	R8,37±0,05	85	-0,002	-0,016	20
51217 FAG, S	9,3	-0,06	125	-0,002	-0,021	105	±0,04	7,75	0	-0,03	R8,37±0,05	88	0,2	0	18,5
51305 A / 06	5,2	-0,03	52	-0,002	-0,015	38,5	±0,02	4,22	0	-0,03	R5,14±0,05	25	-0,001	-0,008	13,5
51305 A / 07	5,2	-0,03	52	-0,002	-0,015	38,5	±0,02	4,22	0	-0,03	R5,14±0,05	27	0,15	0	12,5
51305 FAG, S	5	-0,03	52	-0,002	-0,015	38,5	±0,02	4	0	-0,02	R5,4±0,04	25	-0,001	-0,008	13,5
51305 FAG, S	5	-0,03	52	-0,002	-0,015	38,5	±0,02	4	0	-0,02	R5,4±0,04	27	0,15	0	12,5
51306 A / 06	6,4	-0,03	60	-0,002	-0,015	45	±0,02	5,323	0	-0,02	R5,57±0,05	30	-0,001	-0,008	15
51306 A / 07	6,4	-0,03	60	-0,002	-0,015	45	±0,02	5,323	0	-0,02	R5,57±0,05	32	0,15	0	14
51306 FAG, S	6,4	-0,03	60	-0,002	-0,015	45	±0,02	5,341	0	-0,02	R5,58±0,04	30	-0,001	-0,008	15
51306 FAG, S	6,4	-0,03	60	-0,002	-0,015	45	±0,02	5,341	0	-0,02	R5,58±0,04	32	0,15	0	14
51307 A / 06	7,2	-0,04	68	-0,002	-0,015	51,5	±0,03	6,03	0	-0,03	R6,43±0,06	35	-0,001	-0,01	16,5
51307 A / 07	7,2	-0,04	68	-0,002	-0,015	51,5	±0,03	6,03	0	-0,03	R6,43±0,06	37	0,15	0	15,5
51307 FAG, S	7,2	-0,04	68	-0,002	-0,015	51,5	±0,03	6	0	-0,02	R6,48±0,045	35	-0,001	-0,01	16,5
51307 FAG, S	7,2	-0,04	68	-0,002	-0,015	51,5	±0,03	6	0	-0,02	R6,48±0,045	37	0,15	0	15,5
51309 A / 06	8,3	-0,04	85	-0,002	-0,018	65	±0,03	6,839	0	-0,03	R7,72±0,07	45	-0,001	-0,01	20
51309 A / 07	8,3	-0,04	85	-0,002	-0,018	65	±0,03	6,839	0	-0,03	R7,72±0,07	47	0,15	0	19
51309 FAG, S	8	-0,05	85	-0,002	-0,018	65	±0,03	6,46	0	-0,02	R8,13±0,05	45	-0,001	-0,01	20
51309 FAG, S	8	-0,05	85	-0,002	-0,018	65	±0,03	6,46	0	-0,02	R8,13±0,05	47	0,15	0	19
51311 A / 06	10,2	-0,05	105	-0,002	-0,018	80	±0,03	8,353	0	-0,04	R9,87±0,06	55	-0,002	-0,012	25
51311 A / 07	10,2	-0,05	105	-0,002	-0,018	80	±0,03	8,353	0	-0,04	R9,87±0,06	57	0,2	0	24
51311 FAG, S	10,75	-0,05	105	-0,002	-0,018	80	±0,03	8,769	0	-0,03	R9,42±0,055	55	-0,002	-0,012	25
51311 FAG, S	10,75	-0,05	105	-0,002	-0,018	80	±0,03	8,769	0	-0,03	R9,42±0,055	57	0,2	0	24
51312 A / 06	10,2	-0,05	110	-0,002	-0,018	85	±0,03	8,353	0	-0,04	R9,87±0,06	60	-0,002	-0,012	25
51312 A / 07	10,2	-0,05	110	-0,002	-0,018	85	±0,03	8,353	0	-0,04	R9,87±0,06	62	0,2	0	24
51312 FAG, S	10,75	-0,05	110	-0,002	-0,018	85	±0,03	8,769	0	-0,03	R9,42±0,055	60	-0,002	-0,012	25

51312 FAG, S	10,75	-0,05	110	-0,002	-0,018	85	±0,03	8,769	0	-0,03	R9,42±0,055	62	0,2	0	24
51313 A / 06	10,7	-0,05	115	-0,002	-0,018	90	±0,03	8,853	0	-0,04	R9,87±0,06	65	-0,002	-0,012	25
51313 A / 07	10,7	-0,05	115	-0,002	-0,018	90	±0,03	8,853	0	-0,04	R9,87±0,06	67	0,2	0	24
51313 FAG, S	10,8	-0,05	115	-0,002	-0,018	90	±0,03	9	0	-0,03	R9,72±0,055	65	-0,002	-0,012	25
51313 FAG, S	10,8	-0,05	115	-0,002	-0,018	90	±0,03	9	0	-0,03	R9,72±0,055	67	0,2	0	24
51314 A / 06	12,2	-0,05	125	-0,002	-0,021	97,5	±0,03	10,059	0	-0,04	R10,72±0,06	70	-0,002	-0,012	27,5
51314 A / 07	12,2	-0,05	125	-0,002	-0,021	97,5	±0,03	10,059	0	-0,04	R10,72±0,06	72	0,2	0	26,5
51314 FAG, S	12	-0,05	125	-0,002	-0,021	97,5	±0,03	10	0	-0,03	R10,72±0,06	70	-0,002	-0,012	27,5
51314 FAG, S	12	-0,05	125	-0,002	-0,021	97,5	±0,03	10	0	-0,03	R10,72±0,06	72	0,2	0	26,5
51315 A / 06	13	-0,05	135	-0,002	-0,021	105	±0,03	10,868	0	-0,04	R12-0,11	75	-0,002	-0,012	30
51315 A / 07	13	-0,05	135	-0,002	-0,021	105	±0,03	10,868	0	-0,04	R12-0,11	77	0,2	0	29
51315 FAG, S	13,2	-0,05	135	-0,002	-0,021	105	±0,03	11	0	-0,03	R11,88±0,06	75	-0,002	-0,012	30
51315 FAG, S	13,2	-0,05	135	-0,002	-0,021	105	±0,03	11	0	-0,03	R11,88±0,06	77	0,2	0	29
51317 A / 06	14,3	-0,06	150	-0,002	-0,021	118,5	±0,04	11,781	0	-0,04	R13,68±0,05	85	-0,002	-0,016	32,5
51317 A / 07	14,3	-0,06	150	-0,002	-0,021	118,5	±0,04	11,781	0	-0,04	R13,68±0,05	88	0,2	0	31
51317 FAG, S	15	-0,05	150	-0,002	-0,021	117,5	±0,04	12,58	0	-0,03	R12,9±0,07	85	-0,002	-0,016	32,5
51317 FAG, S	15	-0,05	150	-0,002	-0,021	117,5	±0,04	12,58	0	-0,03	R12,9±0,07	88	0,2	0	31
51318 A / 06	14,5	-0,06	155	-0,002	-0,021	122,5	±0,04	12,281	0	-0,04	R13,68±0,05	90	-0,002	-0,016	32,5
51318 A / 07	14,5	-0,06	155	-0,002	-0,021	122,5	±0,04	12,281	0	-0,04	R13,68±0,05	93	0,2	0	31
51318 FAG, S	15,5	-0,06	155	-0,002	-0,021	122,5	±0,04	13,075	0	-0,03	R12,9±0,07	90	-0,002	-0,016	32,5
51318 FAG, S	15,5	-0,06	155	-0,002	-0,021	122,5	±0,04	13,075	0	-0,03	R12,9±0,07	93	0,2	0	31
51405 A / 06	6,9	-0,03	60	-0,002	-0,015	42,5	±0,02	5,633	0	-0,03	R6,86±0,07	25	-0,001	-0,008	17,5
51405 A / 07	6,9	-0,03	60	-0,002	-0,015	42,5	±0,02	5,633	0	-0,03	R6,86±0,07	27	0,15	0	16,5
51405 FAG, S	7	-0,03	60	-0,002	-0,015	42,5	±0,02	5,75	0	-0,03	R6,76±0,045	25	-0,001	-0,008	17,5
51405 FAG, S	7	-0,03	60	-0,002	-0,015	42,5	±0,02	5,75	0	-0,03	R6,76±0,045	27	0,15	0	16,5
51406 A / 06	8,3	-0,03	70	-0,002	-0,015	50	±0,02	6,839	0	-0,03	R7,72±0,07	30	-0,001	-0,008	20
51406 A / 07	8,3	-0,03	70	-0,002	-0,015	50	±0,02	6,839	0	-0,03	R7,72±0,07	32	0,15	0	19
51406 FAG, S	8	-0,03	70	-0,002	-0,015	50	±0,02	6,46	0	-0,03	R8,13±0,05	30	-0,001	-0,008	20
51406 FAG, S	8	-0,03	70	-0,002	-0,015	50	±0,02	6,46	0	-0,03	R8,13±0,05	32	0,15	0	19
51407 A / 06	9,6	-0,04	80	-0,002	-0,015	57,5	±0,03	8,045	0	-0,03	R8,57±0,08	35	-0,001	-0,01	22,5
51407 A / 07	9,6	-0,04	80	-0,002	-0,015	57,5	±0,03	8,045	0	-0,03	R8,57±0,08	37	0,15	0	21,5
51407 FAG, S	9,6	-0,05	80	-0,002	-0,015	57,5	±0,03	8	0	-0,03	R8,64±0,05	35	-0,001	-0,01	22,5
51407 FAG, S	9,6	-0,05	80	-0,002	-0,015	57,5	±0,03	8	0	-0,03	R8,64±0,05	37	0,15	0	21,5
51408 ATNGM	10,7	-0,04	90	-0,002	-0,018	65	±0,03	8,853	0	-0,03	R9,87±0,06	40	-0,001	-0,01	25
51408 ATNGM	10,7	-0,04	90	-0,002	-0,018	65	±0,03	8,853	0	-0,03	R9,87±0,06	42	0,15	0	24
51408 FAG, S	11	-0,05	90	-0,002	-0,018	65	±0,03	9,25	0	-0,03	R9,45±0,05	40	-0,001	-0,01	25
51408 FAG, S	11	-0,05	90	-0,002	-0,018	65	±0,03	9,25	0	-0,03	R9,45±0,05	42	0,15	0	24
51409 A / 06	11,6	-0,04	100	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	9,559	0	-0,03	R10,72±0,06	45	-0,001	-0,01	27,5
51409 A / 07	11,6	-0,04	100	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	9,559	0	-0,03	R10,72±0,06	47	0,15	0	26,5
51409 FAG, S	11,5	-0,05	100	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	9,5	0	-0,03	R10,8±0,055	45	-0,001	-0,01	27,5
51409 FAG, S	11,5	-0,05	100	-0,002	-0,018	72,5	±0,03	9,5	0	-0,03	R10,8±0,055	47	0,15	0	26,5
51410 FAG / C	13	-0,05	110	-0,002	-0,018	80	±0,03	10,785	0	-0,03	R11,56±0,06	50	-0,002	-0,01	30
51410 FAG / C	13	-0,05	110	-0,002	-0,018	80	±0,03	10,785	0	-0,03	R11,56±0,06	52	0,15	0	29
51410 A, SKF	12,9	-0,05	110	-0,002	-0,018	80	±0,03	10,765	0	-0,03	R11,36±0,06	50	-0,002	-0,01	30
51410 A, SKF	12,9	-0,05	110	-0,002	-0,018	80	±0,03	10,765	0	-0,03	R11,36±0,06	52	0,15	0	29
51411 A / 06	13,8	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	11,281	0	-0,03	R13,68±0,05	55	-0,002	-0,012	32,5
51411 A / 07	13,8	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	11,281	0	-0,03	R13,68±0,05	57	0,2	0	31,5
51411 FAG / C	14,5	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	12,094	0	-0,04	R12,85±0,06	55	-0,002	-0,012	32,5
51411 FAG / C	14,5	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	12,094	0	-0,04	R12,85±0,06	57	0,2	0	31,5
51411 SKF / C	13,8	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	11,281	0	-0,03	R13,68±0,05	55	-0,002	-0,012	32,5
51411 SKF / C	13,8	-0,05	120	-0,002	-0,018	87,5	±0,03	11,281	0	-0,03	R13,68±0,05	57	0,2	0	31,5