

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství

Autor: Bc. Michal Koptiš
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství
Studijní obor: Technologie obrábění, projektování a metrologie

PRAHA 2016

©

(zadání)

Zadání2

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně. Všechny informační zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou citovány v práci a uvedeny v kapitole seznam použitých zdrojů.

V Praze _____

Bc. Michal Kotpiš

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za podnětné připomínky, rady a komplexní vedení při zpracování diplomové práce.

Anotace

Obsahem práce je využití laser scanneru pro reverzní inženýrství. V první polovině práce autor pojednává o přehledu souřadnicové měřicí techniky a snímacích systémech se zaměřením na metodu laserového skenování. V praktické části autor popisuje postup reverzního inženýrství na konkrétní součásti a zabývá se experimentem pro ovlivnění rozměrových a geometrických charakteristik vlivem naneseného zmatňujícího prášku na lesklé, obtížně skenované povrchy.

Annotation

The subject of this thesis is the use of laser scanner for reverse engineering. In the first part, the author discusses overview of coordinate measuring technology and probing systems, focusing on method of laser scanning. In the practical part, author describes process of reverse engineering on specific part and is engaged in experiment to influence dimensional and geometric characteristics due sprayed powder applied to shiny, hard to scan, surfaces.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, mrak bodů, polygonová síť, parametrický model, souřadnicové měřicí stroje, laser scanner, metrologie.

Keywords

Reverse engineering, point cloud, mesh, parametric model, coordinate measuring machines, laser scanner, metrology.

Přehled použité symboliky

CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
SMR	Spherically Mounted retro Reflector – přenosný sférický koutový odražeč
MPE	Maximum Permissible Exposure – maximální přípustné záření
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované projektování
PSD	Position Sensitive Detector – polohově citlivý detektor
CCD	Charge-Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
STL	Stereolithography – stereo litografická síť
SW	Software
RE	Reverse Engineering – reverzní inženýrství

Obsah

Anotace	7
Klíčová slova.....	8
Přehled použité symboliky	9
Úvod.....	12
1 Souřadnicové měřicí stroje a snímací senzory.....	13
1.1 Konstrukční uspořádání CMM a jejich typické aplikace	14
1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM	14
1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM.....	18
1.2 Rozdělení snímacích systémů CMM.....	22
1.2.1 Kontaktní snímače.....	24
1.2.2 Bezkontaktní snímače	27
1.2.3 Porovnání kontaktního a bezkontaktního (laser scanner) měření	44
2 Reverzní inženýrství, postup a typické úlohy.....	46
2.1 Oblasti využití	47
2.2 Postup reverzního inženýrství	49
3 Praktická ukázka postupu reverzního inženýrství na konkrétní součásti	53
3.1 Skenování	54
3.2 Polygonová síť.....	56
3.3 Parametrický model.....	59
3.3.1 Porovnání modelu s polygonovou sítí.....	66
4 Návrh metody pro zjištění tloušťky nanesené vrstvy spreje.....	67
4.1 Tloušťka nanesené vrstvy prášku	79
4.2 Ovlivnění geometrických specifikací	82
4.3 Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení	85
4.4 Vliv měřicí metody a měřicího software na výsledky měření.....	86
4.4.1 Porovnání na ložiskové kouli	86
4.4.2 Multivawe element.....	87
Závěr	90

Literatura	91
Seznam obrázků	94
Seznam tabulek	97
Seznam příloh.....	98

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití snímacího systému laser scanneru pro reverzní inženýrství a problematikou sběru dat z obtížně skenovaných povrchů.

První kapitola popisuje základní rozdělení souřadnicové měřicí techniky. Je uveden přehled souřadnicových měřicích strojů a jejich využití v praxi. Stroje autor rozděluje do dvou kategorií dle souřadného systému, ve kterém pracují. Dále je popsáno rozdělením snímacích systémů pro tyto stroje se zaměřením na snímací systém laser scanner. Ve druhé kapitole autor teoreticky popisuje princip reverzního inženýrství a uvádí oblasti využití této technologie.

Ve třetí kapitole autor popisuje názornou ukázkou postupu reverzního inženýrství na konkrétní součásti. Zabývá se problematikou sběru dat na obtížně skenovaných površích a postupnou tvorbou parametrického modelu z mraku bodů. V jednotlivých podkapitolách uvádí postup v konkrétních počítačových softwarech, které byly pro tuto práci využity. V poslední kapitole práce autor popisuje experiment, který navrhl pro stanovení vlivu nástřikového zmatňujícího prášku. Tento experiment byl navržen z potřeby nanesení vrstvy prášku na reálnou součást, na které je popsán postup reverzního inženýrství.

1 Souřadnicové měřicí stroje a snímací senzory

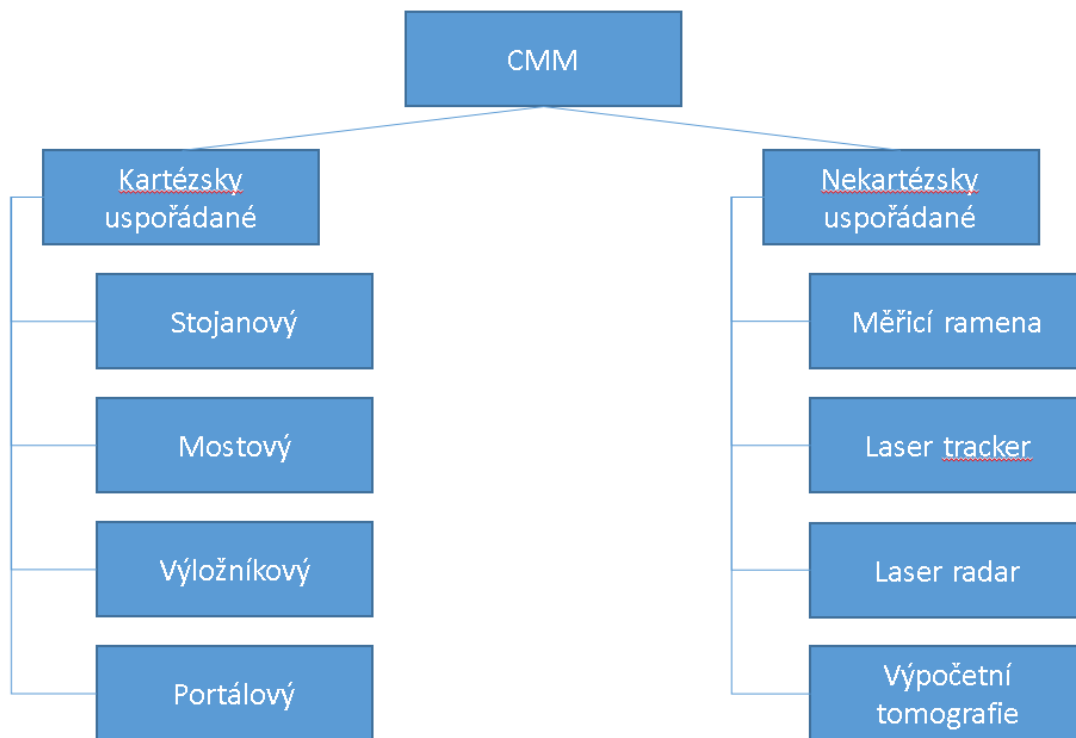
Souřadnicové měřicí stroje (Coordinate Measuring Machines, dále jen CMM) jsou na trhu již přes padesát let a hlavní myšlenka principu snímání bodů (extrakce bodů z reálné součásti) se v průběhu času nijak nezměnila. Princip souřadnicového měření spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru (počátek souřadného systému) a od tohoto bodu se všechny změřené body určují formou souřadnic [1].

Primárním využitím souřadnicových měřicích strojů bylo ke kontrole dílů, které se skládají ze základních matematických elementů. V dnešní době ovšem vyráběné součásti obsahují nejen tyto základní elementy, ale i obecné tvarové plochy. S nástupem softwarů umožňující parametrické CAD modelování za pomoci výpočetní techniky vzrostl počet součástí obsahujících volné tvary. Z toho vyplývají i zvyšující se nároky na měřicí systémy. V případě měření základních geometrických těles postačí běžně užívané metrologické metody. Ovšem v případě měření volných tvarů a jejich porovnání s nominálním tvarem CAD modelu nelze tyto metody využít. V takovém případě je nutné volit sofistikovanější metody extrakce dat z reálné součásti a jejich porovnání s CAD modelem i propracovanější počítačové softwary.

Mimo primární využití slouží dnešní snímací systémy a výpočetní softwary ke zpětné analýze součástí. Pořízení dat matematických elementů i volných tvarů na reálné součásti následně poslouží pro zpětnou analýzu. Tento proces se nazývá reverzní inženýrství a je mu věnována druhá kapitola této práce.

První kapitola této práce se zabývá přehledem souřadnicové měřicí techniky a základním rozdělením strojů, které se využívají pro souřadnicové měření. Dále je v kapitole popsáno základní rozdělení snímačů, které slouží pro extrakci bodů z reálné součásti, se zaměřením na 3D liniové scannery. Liniovým scannerům je věnována větší pozornost, protože slouží jako snímací systém pro praktickou část této práce.

1.1 Konstrukční uspořádání CMM a jejich typické aplikace

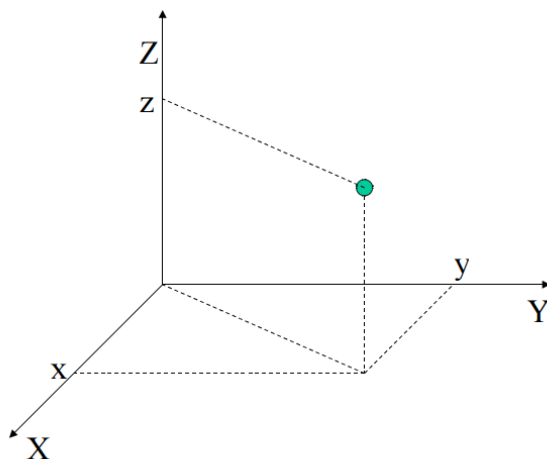


Obr. 1-1: Základní rozdělení CMM

Souřadnicové stroje lze rozdělit dle typu souřadného systému, ve kterém se pohybují a ve kterém snímají body. Takto stanovené pozice bodů v prostoru jsou následně přenášeny do měřicího softwaru, ve kterém jsou dále zpracovávány. Na Obr. 1-1 jsou uvedeny dvě základní kategorie CMM. První kategorii představují stacionární stroje, které pracují v kartézsky uspořádaném souřadnicovém systému. Další kategorie pracuje v nekartézském souřadném systému. Popis procesu odečítání bodů v různých souřadných systémech a základní přehled CMM popisují následující kapitoly.

1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM

Stacionární CMM lze označit za zařízení, které obsahuje tři kartézské ortogonální osy a snímač, kterým jsou zaznamenány souřadnice bodů z povrchu měřeného objektu (elementu). Na Obr. 1-2 je znázorněna kartézská soustava souřadnic. Každý bod je určen prostorovou souřadnicí X, Y, Z. K tomuto účelu jsou CMM vybaveny velmi přesným odečítáním vzdáleností ve všech osách, které je plně kontrolované počítačem.



Obr. 1-2: Kartézský souřadný systém [15]

Dle normy ISO 10360 – 1 se kartézské stacionární CMM rozdělují na tyto základní druhy [3, 4]:

Stojanový typ

Základní částí stojanového CMM je nosný sloup, na kterém se posuvně pohybuje horizontální rameno. Snímací hlava je umístěna na konci tohoto ramene. Třetí posuvnou osu zajišťuje posuvný stůl, na kterém je umístěn měřený díl. Tento typ stroje je specifický relativně malým rozsahem měření. Výhoda tohoto typu stroje je jednoduchá konstrukce a polohovatelnost snímacího systému, nevýhodou je nízká dynamická tuhost, jenž má vliv na výslednou přesnost stroje [4].



Obr. 1-3: Stojanový typ CMM – Zeiss PRO Horizontal Arm [8]

Výložníkový typ

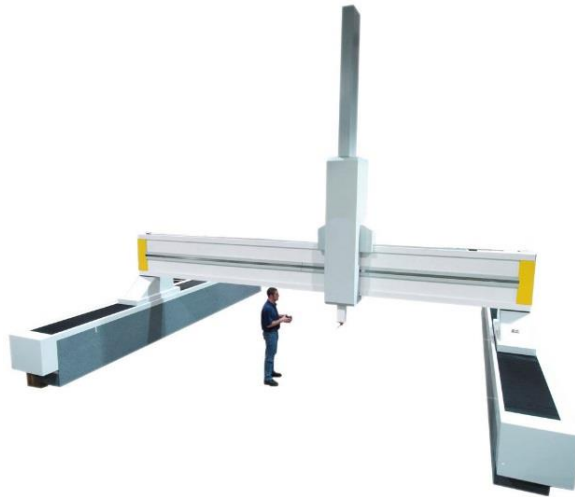
Konstrukční řešení výložníkového typu stroje lze vidět na Obr. 1-4. Na pohyblivém konzolovém rameni je umístěn pojezd s pinolou. Nevýhodou výložníkového typu stroje je ohybový moment zapříčiněný pohybem pinoly (na obrázku pohyb pinoly ve vodorovném směru) a vnáší tak do měření nepřesnost. Vznik průhybu nosníku (pinoly) se eliminuje zavedením korekcí do řídicího systému – vložení korekční mapy. Vzhledem k relativně jednoduché konstrukci a méně náročné údržbě je možné stroj využít jako kontrolní stanoviště ve výrobní hale [4].



Obr. 1-4: Výložníkový typ CMM – Coord 3 Swan runway model [9]

Portálový typ

Jde o typ stroje, který je specifický větším měřicím prostorem (rozsah pracovního prostoru) než ostatní typy stacionárních CMM. Z tohoto důvodu je určen k měření objemných součástí (například celá karoserie automobilu, rozměrné odlitky, letecký a energetický průmysl). Základním konstrukčním prvkem je masivní konstrukce z důvodu eliminace ohybových momentů, které by vznikaly vahou samotné konstrukce. Portálové stroje jsou obvykle vybaveny tzv. duálním pohonem. Tím je myšleno, že každý portál (pravý a levý) pohání samostatná jednotka [4].



Obr. 1-5: Portálový typ CMM – LK V-R [10]

Mostový typ

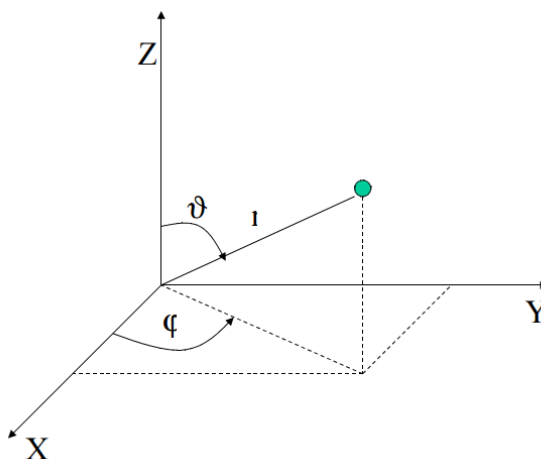
Jedná se o nejrozšířenější typ stacionárních CMM. Základní konstrukci tvoří masivní kamenná deska (žula, granit), na níž je přichycena mostová konstrukce stroje zajišťující pohyb stroje v jedné ose. Jedna část konstrukce mostu je funkční, pohonná a druhá opěrná. Tato konstrukce eliminuje ohybové momenty, které vznikají u výložníkového typu stroje. Po mostové konstrukci pojíždí portál, který zajišťuje pohyb ve druhé ose. Portálem prostupuje pinola, která obstarává pohyb ve třetí ose (pinola vždy určuje pohyb v ose Z). Výhoda této konstrukce je dosahovaná přesnost a opakovatelnost stroje. Z toho důvodu jsou mostové stroje určeny pro přesné měření v laboratorních podmínkách [4].



Obr. 1-6: Mostový typ CMM – LK Altera [11]

1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM

Jak je z názvu patrné, CMM nekartézského typu zajišťují snímání bodů v nekartézském souřadném systému – nejčastěji sférickém systému, který je popsán velikostí radiusvektoru (vzdálenost měřeného bodu od počátku souřadného systému) a dvěma úhly (v metrologii označovanými jako azimut φ a elevace ϑ).



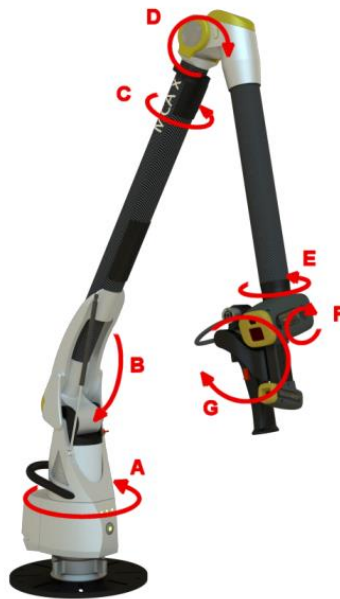
Obr. 1-7: Sférický souřadný systém [15]

Měřicí ramena

Měřicí ramena jsou dnes hojně využívané CMM z důvodu mobility a jednoduché obsluhy zařízení. Na univerzální upínací systém (magnetická upínka, či stativ) je přišroubována konstrukce ramene. Ta se skládá z rotačních kloubů, které obsahují úhlový odměřovací enkodér. Za posledním kloubem je umístěn držák snímacího systému s rukojetí. Na většinu typů ramen je možno uchytit jak dotykovou sondu, tak skenovací laser scanner. Proto jsou ramena často označována za multi senzorový souřadnicový stroj, jímž je možno měřit dotykově i bezdotykově v rámci jednoho měření.

Dle počtu rotačních kloubů se ramena dělí na šestiosá a sedmiosá. Čím více kloubů rameno obsahuje, tím se zhoršuje výsledná přesnost zařízení, protože každým kloubem vzniká další nepřesnost měřidla. Výsledná specifikace je dána součtem všech nepřesností na zařízení (chyba narůstá s počtem enkodérů). Sedmiosé rameno (na Obr. 1-8) má ovšem výhodu v režimu bezdotykového snímání bodů. Při skenování povrchu měřené součásti je důležitá orientace scanneru vzhledem ke snímanému povrchu. Z tohoto důvodu je

poslední kloub (sedmá osa) velmi užitečný při polohování scanneru a umožňuje kvalitnější sběr dat z jednoho umístění ramene a jednoho upnutí součásti. Vzhledem k vlastní hmotnosti zařízení jsou ramena opatřena vyvažovacím mechanismem, který ulehčuje manipulaci. Bez tohoto mechanismu by byla obsluha zařízení fyzicky náročná a nekomfortní pro operátora stroje. Nevýhodou ramen je výsledná přesnost odečtených bodů. Oproti stacionárním kartézským CMM jsou tato zařízení až o dva řády méně přesná. Ramena pracují ve sférickém souřadném systému – při natažení celého ramene a pohybem ve všech směrech opisuje pracovní prostor koule.



Obr. 1-8: Měřicí rameno Nikon metrology MCAX [12]

Laser tracker

Principem měření je nepřetržité sledování polohy sondy s koutovým odražečem (SMR = Spherically Mounted Retro Reflector) laserovým paprskem a odečítání cylindrických souřadnic (vzdálenost a 2 úhly) sondy na vzdálenost desítek metrů s přesností od 5 μm . Souřadnice sondy jsou přes kontrolér přenášeny do počítače, software je vyhodnocuje a vytváří obraz měřené součásti. Kontrolér řídí polohovací systém hlavice tak, že laserový paprsek neustále přesně sleduje koutový odražeč. Díky patentované technologii TurboADM (Absolute Distance Measurement) může být laserový paprsek interferometru v průběhu měření přerušen a po navázání paprsku je možno pokračovat v měření, ovšem se zhoršenou přesností. K dispozici jsou tři velikosti koutových odražečů SMR a různé

druhy nástavců [13]. Laser tracker umožňuje snímání bodů v bodovém režimu i v režimu skenovacím. Hlavní uplatnění tohoto zařízení je ve velkoobjemové metrologii, tudíž při měření objemných součástí (rozměrné svařované konstrukce a sestavy, letecký, energetický průmysl, stavebnictví, atd.).



Obr. 1-9: Laser tracker API Radian, (zleva: kontrolér, laser tracker, SMR odražeč) [13]

Laser radar

Laser radar je svým konstrukčním řešením velice podobný laser trackeru, ovšem ke snímání bodů nevyužívá koutový odražeč. Snímání bodů je řešeno přímým skenováním povrchu paprskem modulovaného laseru. Z tohoto důvodu lze laser radar považovat za plně automatizované a bezkontaktní měřicí zařízení.

Hlavní uplatnění zařízení je ve velkoobjemové metrologii (měřicí rozsah představuje kulový prostor o poloměru 50m), v automobilovém a leteckém průmyslu, energetickém průmyslu. Laser radar je vhodný pro in-line měření v automatizované lince. Lze nastavit jako stacionární měřidlo, či namontovat na robotické rameno (tento princip je vhodný pro kontrolu karoserií automobilů z vnitřní i vnější pozice, kdy je karoserie vozu uchycena na automatizovaném dopravníku).



Obr. 1-10: Laser radar Nikon MV330 [30]

Tabulka 1-1: Porovnání souřadnicových strojů [11, 12, 14, 16]

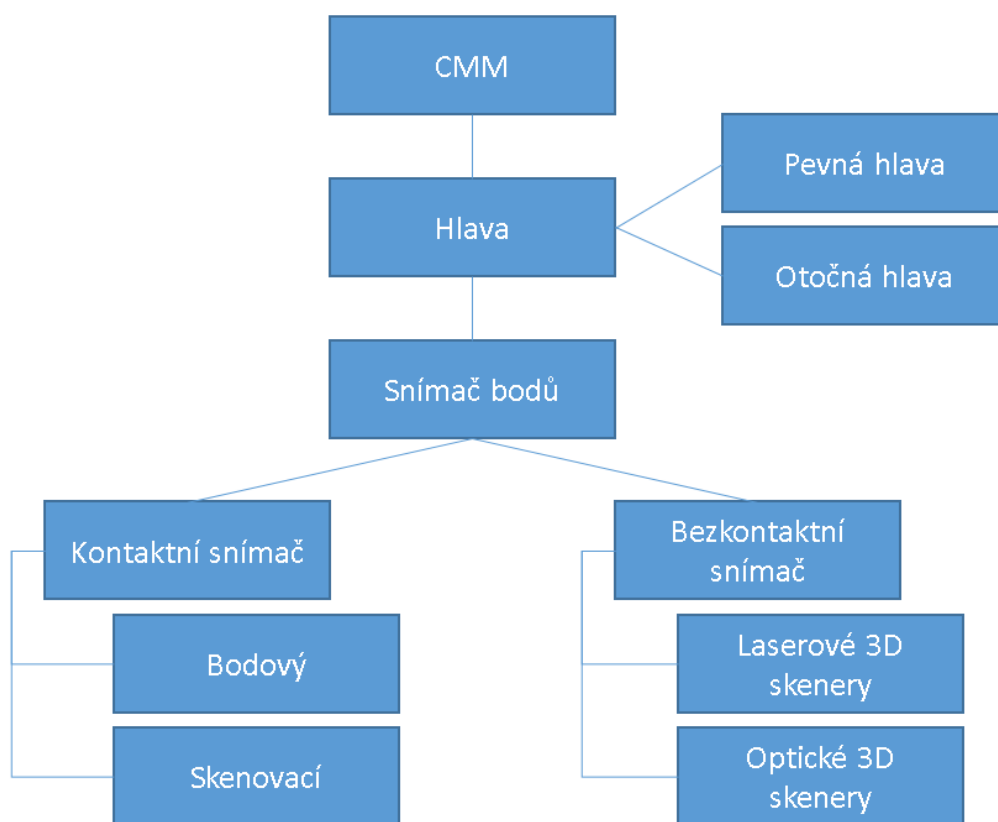
Zařízení	Pořizovací cena [Kč]	Měřicí rozsah [m] / přesnost [μm]	Hlavní výhody
CMM – mostový (Nikon Altera)	od 1 000 000,-	0,7x0,5x0,5 až 7x2x1,5/ od (1,5 μm + L/375)	Přesnost
Ramena (Nikon)	od 700 000,-	2 až 4,5 m / od 33 μm	Mobilita + cena
Laser tracker (API)	od 2 500 000,-	až 120 m / od 5 $\mu\text{m}/\text{m}$	Měřicí rozsah
Laser radar (Nikon)	od 5 000 000,-	50 m / 10 μm +2,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	Měřicí rozsah + bezkontaktní měření

Pořizovací cena a přesnost je pouze orientační, vždy záleží na konkrétní specifikaci stroje. Přesnost konkrétního zařízení je vždy udávána výrobcem na předávacím listu a musí být ověřena při převjímací zkoušce stroje.

CMM jsem vybíral záměrně od jedné společnosti (Laser tracker společnost Nikon nevyrobí, z toho důvodu je do porovnání vybrána společnost API), aby byl znatelný rozdíl mezi jednotlivými technologiemi.

1.2 Rozdělení snímacích systémů CMM

Obecně lze rozlišit metody měření elementů na ty, jež pro určení tvaru a polohy vyžadují přímý kontakt s měřeným objektem - kontaktní metody a na ty, jež přímý fyzický kontakt nepotřebují - bezkontaktní metody. Dalším hlediskem klasifikace metod je rozdělení podle počtu měřených bodů v jednom okamžiku měření. Je-li povrch objektu snímán bod po bodu, je řeč o tzv. bodovém snímání. Pokud se tvar povrchu vyhodnotí v jeden časový okamžik v několika bodech najednou, mluvíme o tzv. plošném nebo liniovém snímání bodů [6]. Na Obr. 1-11 lze vidět základní rozdělení snímačů. V případě stacionárních CMM je mezi strojem a snímačem nasazena hlava stroje. Hlavy se dělí na pevné a otočné.



Obr. 1-11: Rozdělení snímacích systémů CMM

Nosič snímacího systému

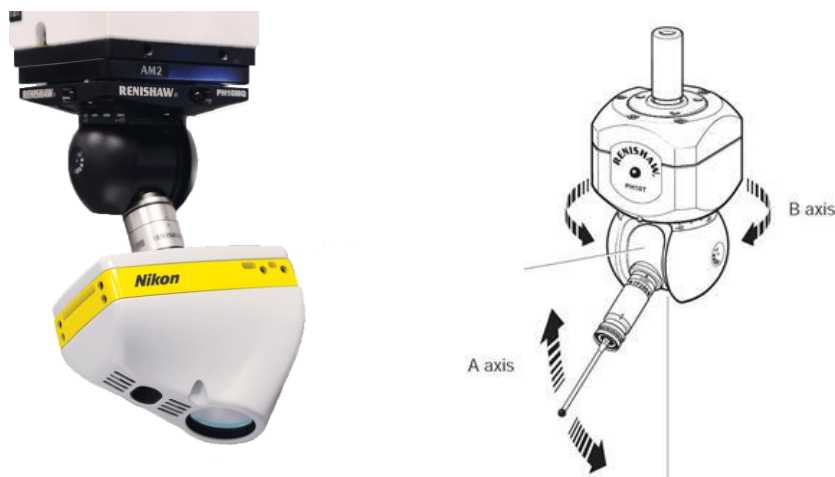
Snímací systém je uchycen na konkrétním prvku stroje, který je dán typem CMM. U měřicích ramen je snímač připevněn za posledním kloubem ramene, zatímco u stacionárních strojů se využívá tzv. hlavy, která je upevněna na konci pinoly. Hlavy se rozdělují na pevné a indexovatelné [7].

Pevné hlavy

Pevné hlavy jsou nasazeny na konec pinoly stacionárního CMM a nemají možnost natáčet snímací systém. Měření součásti je uskutečněno pohybem snímače ve třech osách (osy CMM). Výhodou oproti indexovatelným je eliminace mechanické pohyblivé části celého snímacího systému, a tím eliminace vnesené nepřesnosti. Nevýhodou je nižší produktivita a nutnost použití složitějšího snímače (například hvězdicové doteky).

Indexovatelné (otočné) hlavy

Motorické indexovatelné hlavy jsou určeny k polohování sondy v některé ze 720 poloh (hlava Renishaw PH10M), takže snímání lze provádět v mnoha úhlech. Na Obr. 1-12 lze vidět princip indexace, natočení hlavy je realizováno ve dvou rotačních osách A (0° až 105°) a B (-180° až 180°). Pro obě osy je zaveden krok $7,5^\circ$. Opakovatelnost hlavy umožňuje vyvolat tyto polohy bez nutnosti rekvalifikace (kalibrace snímače), což šetří čas obsluhy a natáčí sondu k povrchu v takovém úhlu, který vede k dosažení co nejpřesnějšího výsledku (z důvodu průhybu snímače). Ovšem při každé aretaci (indexaci) se vnáší do měření další nepřesnost snímacího systému. Výrobci tohoto typu hlavy popisují aretaci do libovolných úhlů natočení jako opakovatelnou, ovšem jakýkoli další mechanický prvek měřicího systému vnáší další nepřesnost. Indexovatelné hlavy lze dobře uplatnit při nasazení laser scannerů na stacionární CMM, protože umožňují součást skenovat z různých úhlů natočení scanneru při jednom upnutí měřené součásti.



Obr. 1-12: Vlevo: Laser scanner nasazený na indexovatelné hlavě Renishaw [16],
vpravo: zobrazení polohovacích os indexovatelné hlavy [17]

Zvláštní kategorií jsou pětiosé dotykové snímací hlavy. Technologie této hlavy podporuje rychlé dotykové spínací měření použitím metody „snímání pohybem hlavy“, u které jsou body měření snímány pouze pohybem hlavy namísto celé konstrukce CMM. Je použit pouze rychlý otáčivý pohyb hlavy, takže body mohou být snímány rychleji [17].

1.2.1 Kontaktní snímače

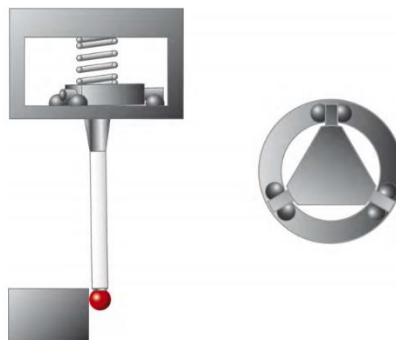
Princip všech dotykových senzorů spočívá v mechanickém dotyku mezi měřenou součástí a snímacím dotekem [7]. Zaznamenání souřadnic bodů se liší u jednotlivých konstrukčních typů snímačů.

Spínací dotykové senzory

Spínací sondy jsou svou konstrukcí určeny ke snímání jednotlivých bodů. Odečet souřadnic konkrétního bodu spočívá v najetí stroje do bezpečné polohy snímače před měřený objekt, plynulou měřicí rychlostí se provede mechanický dotyk a v momentě dotyku kontrolér odečte hodnotu aktuálních souřadnic stroje. Výhodou těchto snímačů je jednoduché provedení a v porovnání s ostatními typy nízká pořizovací cena. Měření samostatných bodů má ovšem za následek nízkou produktivitu a nedokonalý popis měřeného elementu [6, 7].

Kinematická sonda

Jednoduchá spínací kinematická sonda vysílá signál pro odečtení souřadnic pomocí soustavy tří bodů (trojúhelníková charakteristika). V okamžiku dotyku s měřeným objektem se alespoň jeden ze tří kontaktních bodů rozpojí a vznikne signál k přečtení odměřovacího systému CMM. Souřadnice změřeného bodu se vztahují na střed snímacího elementu (kulička, váleček, talířek), který je upevněn na trojbodovém uložení (Obr. 1-13). Nevýhoda tohoto systému je v rozdílné snímací síle při měření (různá poloha dřívku při mechanickém dotyku). Nestálá síla má za následek různou velikost prohnutí snímače a tím nestálost měřicího procesu. Zhoršuje se opakovatelnost odečtu souřadnic [1].



Obr. 1-13: Schéma spínacího snímacího systému [1]

Tenzometrická sonda (elektrická)

Tenzometrická sonda používá k převodu mechanického signálu na elektrický převodník (nejčastěji piezoelektrické prvky). Elektrický signál vykazuje mnohem lepší opakovatelnost a přesnější měření než kinematické sondy, protože eliminuje trojúhelníkovou charakteristiku a hlavně vliv prohnutého snímače. Další výhodou je delší životnost snímače [1].



Obr. 1-14: Schéma tenzometrického snímacího systému [1]

Dotykové skenovací senzory

Spínací dotekové sondy snímají nespojitě body na povrchu, zatímco skenovací systémy shromažďují podstatně větší množství dat z povrchu součásti a poskytují jasnější obraz o tvaru a profilu měřeného povrchu. Skenování se tedy ideálně hodí k měření takových součástí, u kterých je tvar důležitým prvkem pro kvantifikaci celkové chyby. Jsou vhodné i tam, kde je třeba měřit složité povrchy. Při skenování dojde ke kontaktu mezi dotykem sondy a měřenou součástí. Sonda je pak přesouvána tak, aby byl dotek neustále v kontaktu

s povrchem součásti. Během tohoto pohybu jsou snímána data dle základního nastavení obsluhy (rychlost snímání, krok mezi odečítanými body). V průběhu měření je nezbytné udržet velikost výchyly doteku sondy v měřicím rozsahu sondy. Skenovací sondy lze použít také ke snímání nespojitých bodů, podobně jako v případě spínacích dotykových sond. Na trhu je k dispozici široká nabídka řešení vhodných pro libovolné rozměry a konfigurace souřadnicových měřicích strojů [7].

Analogové skenovací systémy

Snímací systém se skládá ze tří pružinových paralelogramů (Obr. 1-15), které mají obvykle rozsah vychýlení $\pm 3\text{mm}$ ve směru měřicích os. Systém pohyblivých cívek generuje měřicí sílu při kontaktu s měřenou součástí. Sílu nastavuje operátor dle druhu měřené součásti (tvar, materiál). Analogové sondy pracují buď v režimu freefloating (současně pracuje ve všech třech osách) nebo v zamknutém režimu, kdy se uzamkne vždy ta osa, která se nevyužívá pro měření. Analogové systémy mohou využívat pasivní senzory (zařízení rozpozná vychýlení sondy) nebo aktivní řízení, které aktivně ovládá vychýlení senzoru a přítlačnou sílu [1].



Obr. 1-15: Analogový skenovací systém Zeiss [1]

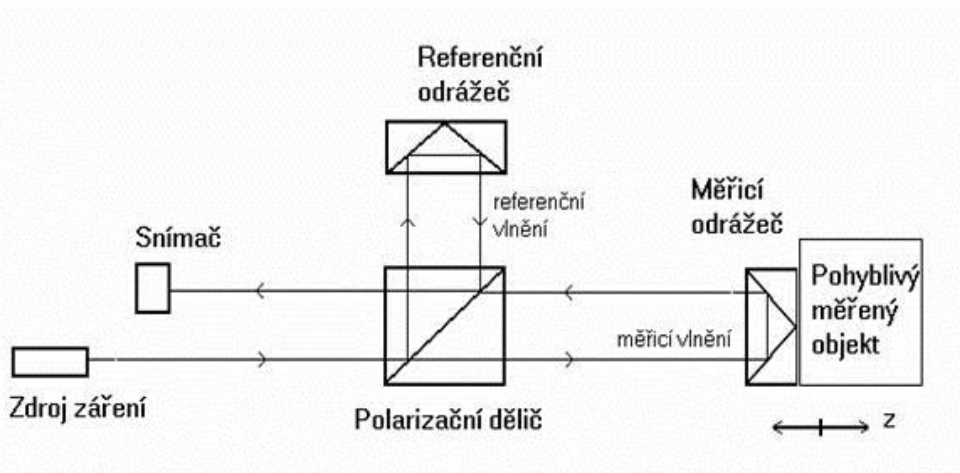
1.2.2 Bezkontaktní snímače

Dosud byly všechny popsané metody snímání bodů založeny na principu odečtu souřadnic v jednom bodě pro jeden časový okamžik. Bezkontaktní metody patří mezi takové, které umožňují odečíst souřadnice velkého množství bodů v jeden časový okamžik.

Běžné měřicí i zobrazovací zařízení transformuje 3D scénu na 2D obraz, a tím dochází ke ztrátě informace o třetí souřadnici (obvykle vzdálenost snímacího zařízení od měřeného povrchu). Metody používané při bezkontaktním režimu snímání bodů v případech, kdy transformací z dvourozměrného obrazu (kamery, CCD snímače, atd.) nechceme ztratit informaci o velikosti třetího rozměru lze rozdělit do tří základních principů [32]:

Interferometrie

Již kolem roku 1880 bylo poprvé prokázáno použití měřicího nástroje využívajícího interference světla. I když se od té doby technologie výrazně vyvinula, základní princip použití velmi malého a stabilního zdroje světla o přesné vlnové délce jako měřicí jednotky setrval i nadále. Interferometrické systémy, neboli interferometry, využívají principu superpozice (skládání) dvou nebo více vln monochromatického či polychromatického koherentního vlnění, která spolu interferují [18, 31]. Vlnění je v polarizačním děliči rozděleno na měřicí a referenční, jak je znázorněno na obrázku 1-16. Tímto způsobem lze zaznamenat nejen amplitudy vln, ale i jejich fázový posun. Interferometrie se vyznačuje vysokou přesností měření až s nanometrickou přesností.



Obr. 1-16: Princip optické interferometrie [32]

Principy založené na této základní metodě optické interferometrie jsou: Interferometrie pracující s více vlnovými délkami, holografická interferometrie, skvrnová interferometrie a interferometrie s bílým světlem. Nejčastěji používanými interferometry jsou: Michelsonův, Sagnacův, Mach-Zehnderův [32]. Pro detailnější poznání všech principů doporučuji prostudovat literaturu [18, 31, 32].

Doba letu paprsku

Velikost souřadnice, která určuje vzdálenost bodu na měřené součásti od snímacího zařízení, lze stanovit z doby letu modulovaného světelného signálu. Doba je měřena od vyslání paprsku zdrojem, odražení od měřené součásti až do zaznamenání jeho zachycení snímacím senzorem.

U obou již zmíněných metod je vyžadováno absolutně přesné a kontinuální měření času, protože rychlost světla ve vakuu je velmi vysoká. Hodnota vzdálenosti se určuje pomocí vzorce:

$$z = c \frac{t}{2} \quad [32], \text{ kde:}$$

z – výsledná vzdálenost [m],

t – měřený čas [s],

c – rychlost světla ve vakuu ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$).

Měřicí přístroj založený na metodě měření doby letu paprsku je složen nejen z optické části, ale i vysokofrekvenční elektronické části, která se stará o modulaci paprsku. Elektronická část přináší značná časová zpoždění, a proto je tato metoda podstatně méně přesná než metoda interferometrická. Interferometrická metoda provádí mixování, korelaci i srovnání měřicího kanálu s referenčním kanálem přímo ve fotodetektoru téměř bez zpoždění a chyb [32].

Triangulace

Princip triangulace vyplývá z pozice jednotlivých částí triangulačního senzoru. Hlavními částmi senzoru jsou zdroj světelného paprsku (laserová dioda) a detektor, který se skládá z optického prvku a detektoru polohy (nejčastěji CCD, či PSD snímač) [6].

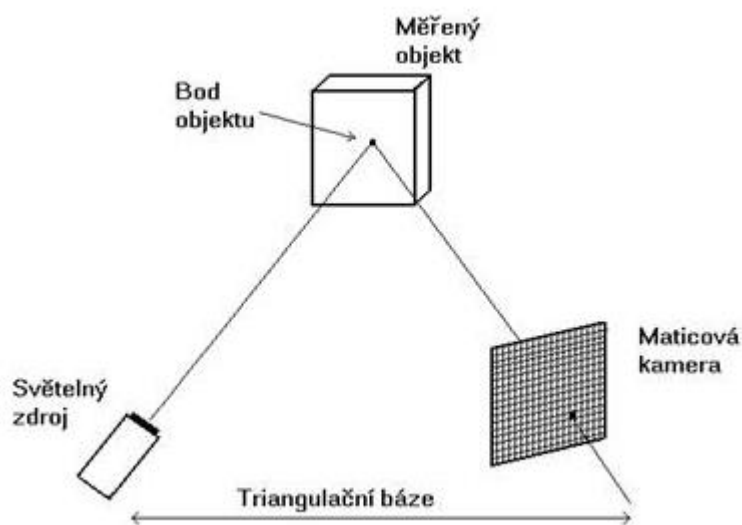
Triangulační metody patří mezi nejpoužívanější v optickém měření. Jednotlivé varianty triangulace jsou založené na stejném principu, ovšem jsou od sebe odlišné.

Aktivní triangulace

Princip aktivní triangulace lze pochopit z obrázku 1-17. Zdroj emitovaného světla, povrch měřené součásti a snímací detektor spolu tvoří triangulační trojúhelník. Spojnice mezi světelným zdrojem a detektorem se nazývá triangulační báze (základna). Tato vzdálenost je pokaždé konstantní, protože zdroj a detektor tvoří jeden celek (například laser scanner). Zdroj svírá se základnou neměnný úhel, kdežto hodnota úhlu na straně detektoru je proměnná dle vzdálenosti měřeného povrchu od snímacího senzoru. Na základě velikosti úhlu mezi měřeným povrchem a detektorem lze určit z-ovou souřadnici objektu [32].

Dle promítaného vzoru paprsku se aktivní triangulace dále dělí:

1. 1D triangulace – světelný paprsek v podobě bodu (Obr. 1-17)
2. 2D triangulace – bod rozptýlen na světelný pruh
3. 3D triangulace – strukturovaný světelný svazek



Obr. 1-17: Triangulační trojúhelník pro 1D aktivní triangulaci[32]

Pasivní triangulace

Název pasivní určuje, že tato metoda neuvažuje geometrické uspořádání osvětlení měřené součásti (oproti aktivní metodě). Princip metody je určen na různých formách digitální fotogrammetrie (viz kapitola Fotogrammetrie). Základní metody pasivní triangulace jsou:

1. více kamer se známou orientací, nebo se samokalibrací (pro dynamické systémy, kde jsou známy polohy jednotlivých kamer, nebo se využívá samokalibrování),
2. jedna kamera z různých poloh se samokalibrací (pro statické scény, kde jedna kamera zaznamenává snímky z více různých pohledů).

Pro samokalibrovací metody se využívá kalibrační předmět, u něhož předem známe rozměry a tvar. Tento předmět je nutné zaznamenat ve všech měřicích snímcích. Všechny potřebné parametry jsou určeny z natočení a změny měřítka předmětu. Při samokalibrování nemusí být poloha kamer předem známa. Relativní poloha kamer, vzhledem k měřené součásti, a jejich vzájemná poloha je určena přímo ze snímků pomocí kalibračního předmětu [32].

Aktivní a pasivní triangulace jsou dvě hlavní triangulační metody. Krom těchto metod lze do triangulace dále zařadit fokusovací metodu a metodu podoby ze stínování.

Fokusovací metoda

Důležitými parametry u fokusovací metody jsou hloubka ostrosti a průměr kroužku vzniklého difrakcí v ohniskové rovině. Průměr kroužku závisí na ohniskové vzdálenosti. Používají se tři typy fokusování: konfokální mikroskopie, kontrolované fokusování a rozfokusování [32].

Podoba ze stínování

Tato metoda je založena na principu určení normálových vektorů na povrchu měřené součásti. Normály jsou určeny z ozáření, stínů a odlesků, kdy je známa pozice kamery a zdrojů světla. 3D tvary měřené součásti jsou následně vypočteny z jednotlivých normálových vektorů [32].

Pro výběr správné metody při měření rozhoduje více faktorů. Mezi nejdůležitější patří vzdálenost měřeného předmětu od senzoru, rozměr měřeného předmětu, požadovaná přesnost měření, vlastnosti povrchu předmětu.

Metody bezkontaktního měření

Bezkontaktní metody snímání bodů lze rozdělit do těchto základních skupin [2, 7, 18]:

- Optické: fotogrammetrie, pruhová projekce.
- Laserové: laser scannery
- Rentgenové: počítačová tomografie.

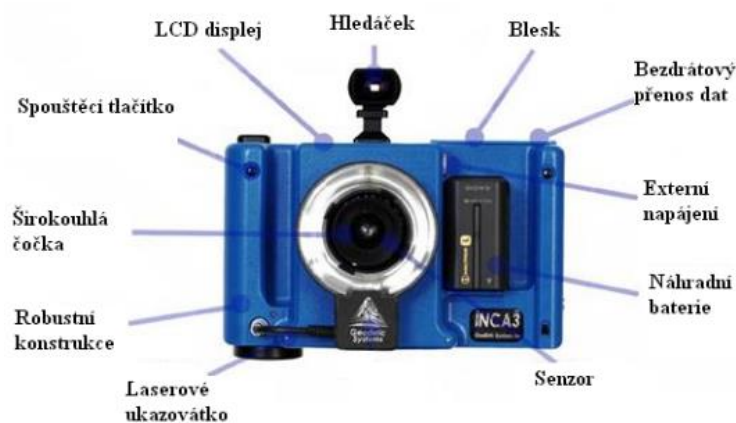
Optické metody

Optické metody jsou založeny na principu pořízení snímků z různých umístění optického zařízení. Kamera je v okamžiku měření statická (při měření dochází k pořízení snímku bez pohybu kamery). Oproti tomu při měření 3D laserovým scannerem je kamera v pohybu. Statická a dynamická kamera je základní rozdíl mezi optickými a laserovými metodami pořízení dat. Každá metoda využívá konkrétní zařízení pro snímání obrazu (fotoaparáty, pruhové projektory).

Fotogrammetrie

Fotogrammetrické metody jsou založeny na principu zpracování informací z fotografických snímků získaných jedním obrazovým senzorem. Nejčastěji je senzorem speciální digitální fotoaparát (Obr. 1-18).

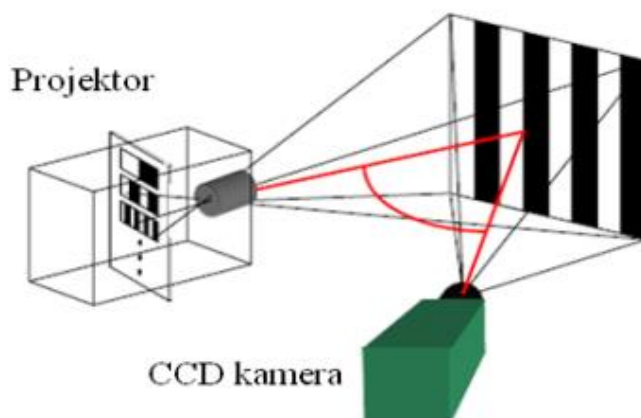
Dále se rozděluje na jedno snímkovou a více snímkovou fotogrammetrii. Jedno snímková pracuje jen se samostatnými měřicími snímky, kde porovnává rozdíl mezi dvěma rovinami – předmětová a obrazová. Výsledkem jsou 2D souřadnice měřeného objektu. Více snímková fotogrammetrie umožňuje vyhodnotit z více snímků (minimálně tři snímky) prostorové 3D souřadnice bodu na měřeném objektu. Podmínkou je, aby byl tento bod zachycen na obou snímkách z různého místa pořízení snímku. Více snímková metoda pracuje s pomocnými značkami (referencemi), které se nalepí na měřenou součást. Opět platí podmínka, na každém snímku musí být vidět minimálně tři referenční značky [7, 18, 19].



Obr. 1-18: Fotogrammetrický digitální fotoaparát [2]

Pruhová projekce

Princip je založen na promítnutí několika desítek pruhů na měřenou součást najednou, které se zachytí kamerou, jak lze vidět na obrázku 1-19. Kamera je v okamžiku záznamu statická. Při promítnutí pruhu na součást dojde k vytvoření světelného řezu, který přesně kopíruje zakřivení povrchu součásti. Obvykle nestačí pouze jedno umístění kamery, proto je součást snímána z více pozic kamery. Dílčí obrazy se nakonec spojují pomocí referenčních značek, které se lepí na měřenou součást. Na každém pořízeném snímku musí být viditelné alespoň tři referenční značky [6].



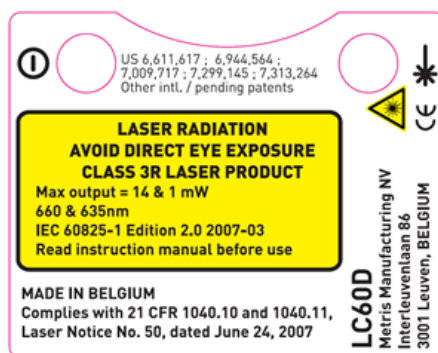
Obr. 1-19: Princip promítání pruhů na součást [2]

Laserové metody

Laserové metody, používané pro metrologické účely, využívají laserové záření, které splňuje požadavky bezpečnostní třídy 2 a 3R na zdroje laserového záření dle IEC/EN60825-1 ve všech provozních i chybových režimech. Dle normy je riziko úrazu limitováno:

- Pokud dojde k neúmyslnému zasažení oka paprskem laseru, jen velmi zřídka může dojít k souběhu všech nepříznivých okolností. To znamená, že paprsek prochází osou čočky oka a zároveň oko je zaostřeno přímo do zdroje záření.
- Výkon laseru je omezen na hodnotu MPE (Maximum Permissible Exposure).
- Vrozené chování oka při expozici jasným světlem v případě viditelného záření a tepelným účinkem na rohovku v případě infračerveného záření zabrání poškození.

Základní zásada při práci se zařízením, které produkuje laserové záření, je, nikdy se přímo nedívat do paprsku laseru a to ani s použitím optických zařízení či přístrojů. Bezpečnostní třída 2 a 3R umožňuje krátkodobý pohled do zdroje záření, protože oko chrání tzv. mrkací efekt. Veškeré technické informace o zařízeních využívajících laser paprsku, důležité z hlediska bezpečnosti práce se zařízením, jsou uvedeny na samolepicím štítku umístěném na měřicím zařízení [33].



Obr. 1-20: Bezpečnostní štítek na laserovém scanneru LC60 [33]

Informace ze štítku:

Laserové záření – vyhněte se přímému pohledu do paprsku laseru.

Třída laserového produktu - Class 3R laser product.

Maximální výstupní výkon = 3.4 & 1mW

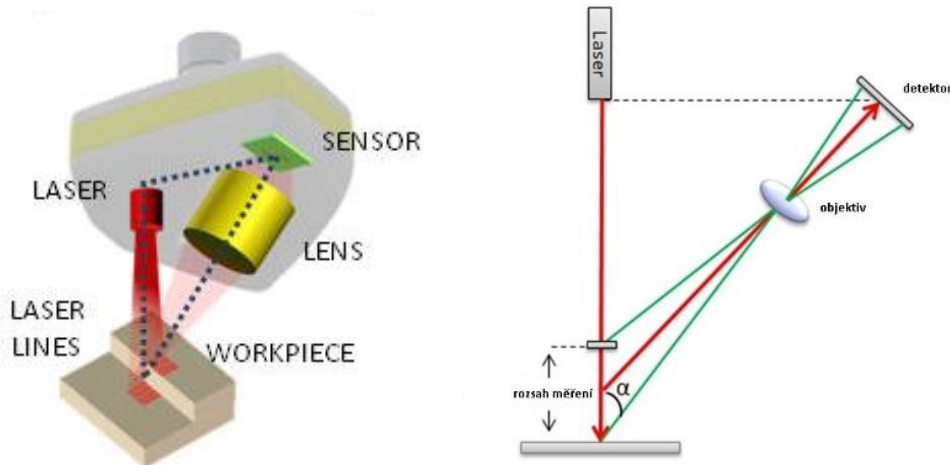
Vlnová délka záření: 660 & 635nm.

IEC 60825-1 Edition 2.0 2007-03.

Zařízení je ve shodě s normami 21 CFR 1040.10 and 1040.11 [33].

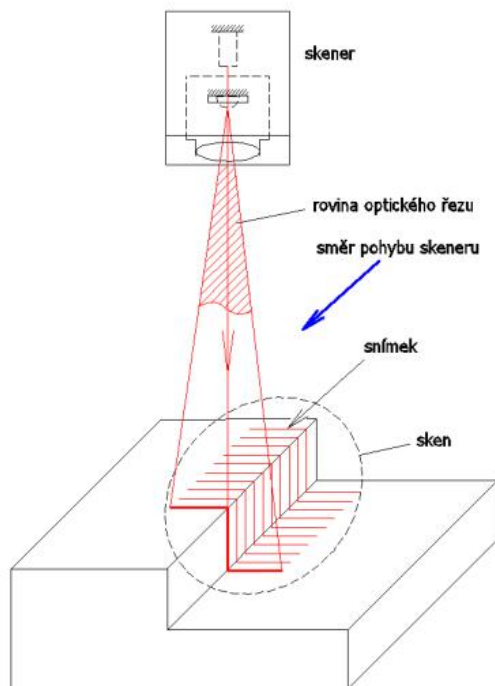
Laser scannery

Laser scannery patří do kategorie laserových liniových snímačů, které využívají pro získání třetího rozměru triangulační metodu. Princip laserového scanneru je tudíž odvozen od principu triangulačního senzoru, který se skládá z optiky (objektiv) a detektoru polohy jak je vidět na obrázku 1-21.



Obr. 1-21: Princip triangulačního senzoru – vlevo 2D triangulace, vpravo 1D triangulace [16, 32]

Triangulační senzor ovšem pracuje jako 1D triangulace, tudíž soustřeďuje paprsek laseru do jednoho konkrétního bodu. Laser scannery využívají při měření laserovou linii, a proto jsou schopny zaznamenat větší množství dat. Využívají metody světelného řezu (laserová linie). Zde je místo jediného bodu promítnuta celá laserová linie na skenovaný povrch a detektor zachycuje obraz této linie (Obr. 1-22). Měřené souřadnice jsou generovány z obrazu linie, která je deformovaná tvarem povrchu [6].



Obr. 1-22: Laserová linie scanneru [6]

Pro rozprostření paprsku laseru na laserovou linii se využívá dvou metod. První metoda rozmítá paprsek vyslaný zdrojem laserového záření na linii rotujícím zrcátkem. U této metody je linie snímána PSD senzorem, neboli Position Sensitive Detector (polohově citlivý detektor). U druhé metody je rozmítání paprsku nahrazeno cylindrickou čočkou, která opět roztáhne paprsek do laserové linie. Scannery s cylindrickou čočkou využívají jako detektor CCD senzor, neboli Charge-Coupled Device (zařízení s vázanými náboji). CCD senzor slouží pro převod dopadajícího světelného záření na velikost elektrického náboje. Scannery s CCD senzorem jsou modernější a méně náchylné na mechanické poruchy scanneru, protože eliminují mechanický pohyb kmitajícího (rotujícího) zrcátka. Z tohoto důvodu je většina dnes používaných a vyvíjených scannerů s CCD senzorem [34].

Extrakce bodů ze součásti:

V průběhu snímání dat se scanner pohybuje nad skenovanou součástí v určité vzdálenosti, která je dána typem scanneru a jeho rozlišovací schopností. Z toho je pevně stanoven

rozsah měření (Obr. 1-21). Rozsahem měření rozumíme vzdálenost scanneru od měřeného povrchu součásti.

Pohyb scanneru závisí na CMM, na němž je scanner připevněn. U měřicích ramen je pohyb určen manuálním naváděním scanneru okolo součásti. Pokud je scanner upevněn na konci pinoly stacionárního souřadnicového stroje, pohyb scanneru je programově řízen. V měřicím sw se zadá počáteční poloha scanneru, koncová poloha a rychlost snímání. Scanner zaznamená jednotlivé snímky (laserové linie) mezi počáteční a koncovou polohou. Vzdálenost jednotlivých řádků ve snímku mezi sebou je dána frekvencí snímání obrazu a rychlostí skenování. Rychlost skenování lze nastavit dle požadavku. Vzdálenost linií mezi sebou je pro celý sken od počáteční do koncové polohy konstantní v případě skenování rovné plochy. Pokud je plocha tvarová, vzdálenost nemusí být konstantní, ale je deformována s tvarem tvarové plochy. Uspořádání bodů v linii je na rovinné ploše rovnoměrné a na tvarové může být opět deformované a neuspořádané. Moderní scannery jsou schopny zaznamenat až 200 000 bodů za vteřinu. Po naskenování důležitých částí součásti, nebo součást celá, je zaznamenáno obrovské množství dat (řádově miliony bodů), které se nazývá mrak bodů (překlad z anglického point cloud). Každý bod je určen prostorou souřadnicí x, y, z a složkami jednotkového vektoru i, j, k. Vektor představuje orientaci scanneru ke konkrétnímu bodu.

Kvalitu mraku bodů lze posoudit na základě těchto parametrů:

Hustota mraku – je závislá na zmíněných parametrech scanneru: frekvence snímání, rozlišení senzoru, rychlost snímání.

Celistvost mraku – je dána tvarem měřené součásti. Na rovinných a málo zakřivených plochách lze získat souvislý a nepřerušovaný mrak. Ovšem tvarové plochy s vystupujícími částmi z povrchu, hlubokými otvory, žebrováním, překrývajícími se částmi nelze naskenovat celistvě. Důvodem je zastínění laserové linie, či snímací kamery.

Šum – je dán citlivostí kamery. Citlivost se nastavuje dle charakteru povrchu součásti. U tmavých povrchů je nutné snížit citlivost, protože laserová linie je slabší a odraz linie by nebyl kamerou zachycen. Ovšem při snížení citlivosti vzniká riziko zachycení šumu (neboli odlehlých bodů), které nenáleží skenované ploše. Tomuto problému částečně pomohl přechod z analogových scannerů na digitální. Analogový detektor obrazu zvládá

přiřadit celému snímku pouze jednu hodnotu intenzity (u lesklých povrchů se zaznamená jen několik málo bodů). Zatímco digitální kamery s CCD prvkem umožňují vyhodnotit intenzitu pro každý bod senzoru zvlášť. Proto je možné převést všechny osvětlené body senzoru do bodů mraku.

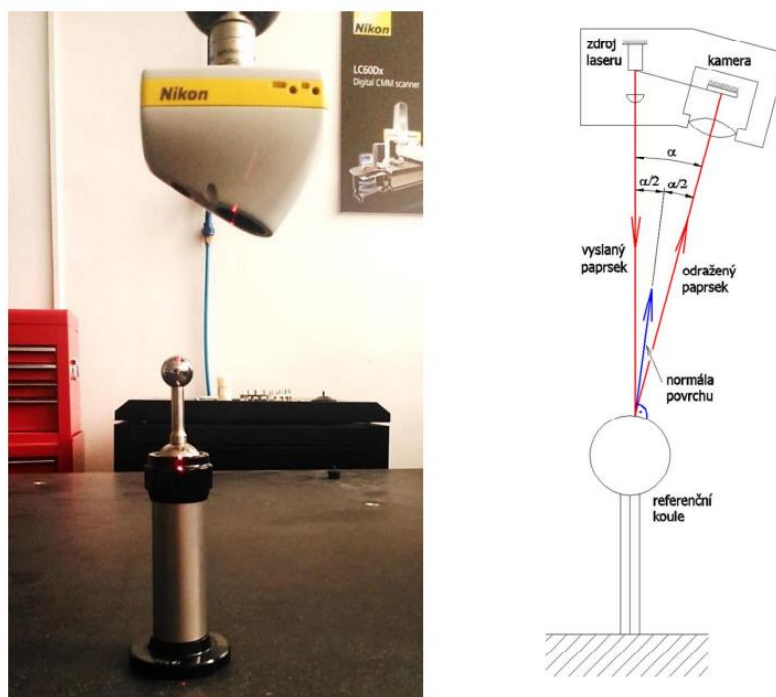
Přesnost – závisí na parametrech scanneru, parametrech lokalizéru (rameno, stacionární CMM), vlivu prostředí (hlavní vlivy jsou teplota, vlhkost a umělé osvětlení), zkušenosti operátora a charakteru skenované plochy [6, 16].

Obtížně skenované povrchy:

Charakteristika povrchu měřené součásti má významný vliv na skenovaná data. Vlivem povrchu, který není vhodný pro skenování, dochází k nepříznivým vlivům při sběru dat. Mezi obtížně skenované povrchy patří vysoce lesklé, transparentní, semi-transparentní povrchy a povrchy, které nejsou jednolitě (například sestava, která obsahuje plastové i kovové prvky). Na vysoce lesklé povrchy laserová linie dopadne a odrazí se pryč. Optický řez se nevytvoří a senzor nezaznamená data. U transparentních a semi-transparentních povrchů dochází k úplnému, nebo částečnému průchodu laserové linie skrz snímáný povrch. Optický řez se buď nevytvoří vůbec, nebo se vytvoří mimo zorné pole kamery. Řez se může vytvořit i v zorném poli kamery, ovšem ne na povrchu měřené součásti, ale posunutý pod skutečný povrch. Výsledkem je přesný tvar měřených ploch, ale tvar je posunut o offset oproti skutečnému povrchu.

Povrchy, které nejsou vhodné pro skenování, vnášejí do výsledného mraku bodů nekorektně snímané body. Tyto body mohou být způsobené jedním z těchto vlivů: Sekundární odraz paprsku, přímý odraz paprsku do osy kamery, odlehlé body skenu a překrytí dat. Popis jednotlivých vlivů popisuje literatura [6] v přehledu použité literatury.

Na obrázku 1-23 lze vidět přímý odraz paprsku laserové linie do kamery scanneru.



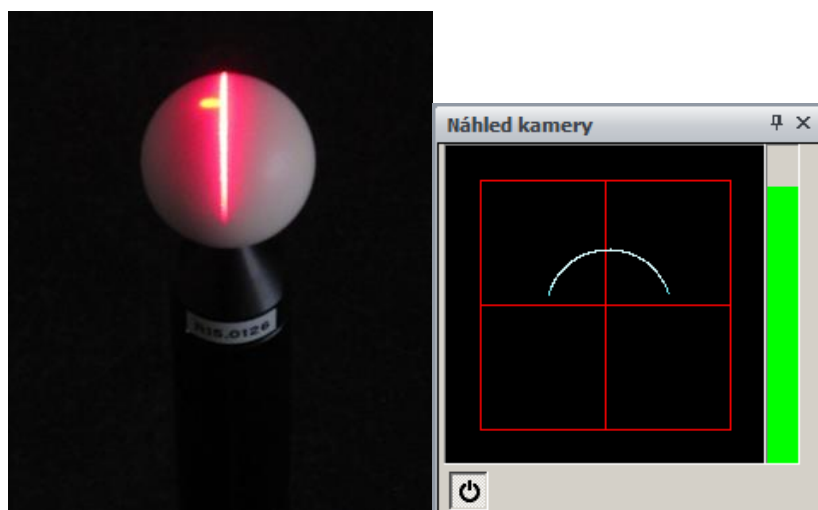
Obr. 1-23: Přímý odraz paprsku do kamery [6]

Výše zmíněné povrchy přesto lze naskenovat s použitím speciálního nástřikového spreje (Obr. 1-24). Jedná se o zmatňující práškový sprej, který se primárně využívá jako vývojka pro kapilární zkoušky při nedestruktivní zkoušce svarových spojů. Prášek neobsahuje aromatické přísady, je jemně zrnitý, bílé barvy. Nanáší se na součásti vzduchem, za běžné pokojové teploty.



Obr. 1-24: Zmatňující sprej [35]

Nanesený prášek vytvoří na součásti matnou vrstvu, která je vhodná pro skenování. Na obrázku 1-25 je zobrazena referenční koule pro laser scanner, která má povrch matný, bílý. Vrstva prášku vytvoří na součásti téměř stejný povrch (z hlediska skenování) jako má referenční koule. Referenční koule je vyhotovena striktně dle standardů a tvar kulového povrchu je kvalitnější než v případě koule nastříkané sprejem. Referenční kouli uvádím pro názornou ukázkou vhodného odrazu paprsku od součásti.



Obr. 1-25: Laserová linie na matném a bílém povrchu

U vhodného povrchu pro skenování nedochází k negativním vlivům. Na obrázku 1-25 vpravo je vidět pohled kamery na laserovou linii. Kamera nezaznamenává přímý odraz paprsku směrem do kamery, ani žádné sekundární odrazy.

Filtrace mraku bodů:

Nasnímaný mrak bodů obsahuje značné množství dat a pro vyhodnocení měření nelze použít všechny. Množství dat jednak zhoršuje práci s měřicím sw a ne všechny nasnímané body lze považovat za korektní pro vyhodnocení měření. Měřicí softwary obsahují sadu funkcí pro práci s mrakem bodů. Práce s mrakem bodů je poměrně rozsáhlá činnost, a proto jsou níže popsány pouze základní operace. Tyto operace jsou nezbytné pro vyhodnocení měřených dat, porovnání dat s CAD modelem a současně pro export mraku bodů z měřicího sw. Jednotlivé operace jsou popsány chronologicky dle postupu při práci s mrakem bodů.

První operace po nasnímání mraku bodů sestává z odstranění dat mechanicky uživatelem. Uživatel má možnost vybrat body, které budou smazány. Tato operace se nazývá ořezání mraku bodů a využívá se pro eliminaci bodů, které na první pohled nepatří měřené součásti. Jedná se o upínku měřené součásti (přípravek, svěrák, atd.) a granitovou desku souřadnicového stroje.

Pokud je mrak bodů tvořen z více skenů, nastane překrytí určitých částí skenů mezi sebou. Následně je část skenovaného povrchu nasnímána více než jedenkrát. Jednotlivé skeny lze spojit, oddělit, či odečítat mezi sebou. Funkce odečítání umožňuje odfiltrovat překrývající se data. Jeden sken se vybere jako referenční a pokud jiný sken obsahuje data, která se překrývají s referenčním skenem, budou tato data odstraněna.

Další operací je filtrace mraku bodů. Jednotlivé měřicí sw se v této problematice liší a své algoritmy pro filtrování bodů sřeží. Při měření do praktické části této práce jsem pracoval se sw Focus od společnosti Nikon metrology, který má na výběr ze tří různých typů filtrů pro naskenovaná data.

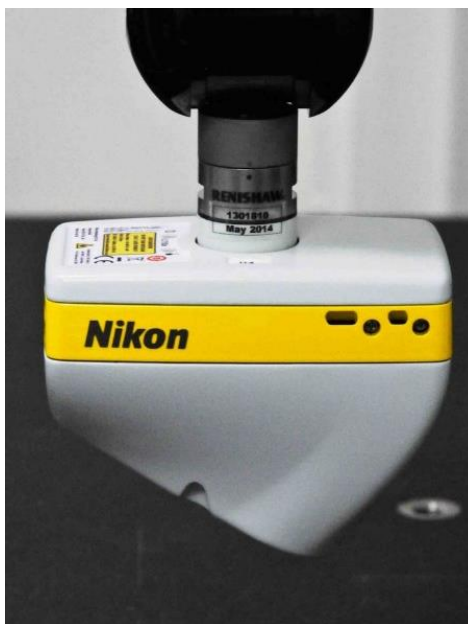
1. Rastrový filtr: Nejjednodušší typ filtru. Operátor má možnost zadat pouze jeden parametr, a to definovat velikost strany krychle, ve které se po filtraci bude nacházet jeden bod z mraku. Všechny ostatní body budou odstraněny. Tento filtr se volí pro snížení počtu bodů v mraku. Obvykle se využívá pro mrak, který obsahuje více jak 10 milionů bodů.
2. Filtr odlehlých bodů: Filtr určuje odlehlé hodnoty na základě počtu sousedních bodů v kulovém poli kolem konkrétního bodu.
3. Křivkový filtr: Kombinuje výhody rastrového filtru a filtru odlehlých hodnot. Kritérium filtrace je interval vzdáleností mezi sousedními body a zakřivení povrchu v okolí posuzovaného bodu [6].

Problematika filtrace mraku bodů je časově náročná a závislá na zkušenosti operátora. Vlivem nevhodného nastavení filtru lze nekorektně ovlivnit výsledek měření.

Typy laser scannerů:

Scanner na stacionární CMM

Scannery na pevné souřadnicové stroje se vyznačují svou přesností. Ze všech typů laser scannerů jsou nejpřesnější. Z toho vyplývá i jejich hlavní použití. Skenování s tímto typem scanneru se využívá pro přesné strojní součásti, tvarově složitější součásti a součásti malých rozměrů. Na obrázku 1-26 je uveden digitální laser scanner Nikon LC15Dx. Momentálně nejpřesnější scanner od společnosti Nikon metrology.



Obr. 1-26: Scanner Nikon LC15Dx na stacionární CMM [33]

Scanner na mobilní zařízení

Scannery, které se připojují na mobilní měřicí ramena. Nedosahují takové přesnosti jako scannery na stacionární stroje, ovšem hlavní výhodou je možnost upnutí na mobilní zařízení. Hlavní uplatnění tedy nalézají u součástí, které není možné přesouvat (či je transport nevýhodný například z hlediska rozměrů a váhy součásti, nebo ceny transportu). Na obrázku 1-27 je uveden digitální laser scanner Nikon modelmaker MMDx 100.



Obr. 1-27: Scanner Nikon MMDx 100 na mobilní měřicí ramena [12]

Cross scanner

Cross scanner je zvláštním typem scanneru na stacionární stroje a princip je založen na 3D aktivní triangulaci (klasický scanner využívá 2D aktivní triangulaci). Vyznačuje se soustavou tří laserových linií a tří snímacích kamer. Tento typ scanneru má oproti běžnému scanneru dvě hlavní výhody. Jednak tři laserové linie zaznamenají v jedné skenovací dráze větší plochu součásti a dále jsou vhodné pro měření zakřivených tvarů, otvorů a výstupků na součásti. Běžný scanner zaznamená v jedné skenovací dráze linie, které jsou rovnoběžné a všechny jsou z jedné orientace scanneru. Při měření například kruhového otvoru je nutné scanner polohovat do více orientací a tím narůstá čas měření. Polohování scanneru (a tím více skenovacích drah) je důležité pro zaznamenání mraku bodů na válcové ploše otvoru pod rovinou ohraničující válcový otvor. Oproti tomu cross scanner má laserové linie natočené po 120° a pro zaznamenání otvoru stačí jedna skenovací dráha. Nevýhodou je výsledná přesnost snímače. Ačkoli jsou cross scannery určeny pro pevné CMM, nedosahují takové přesnosti jako klasické scannery. Na obrázku 1-28 je uveden digitální laser cross scanner Nikon XC65Dx.



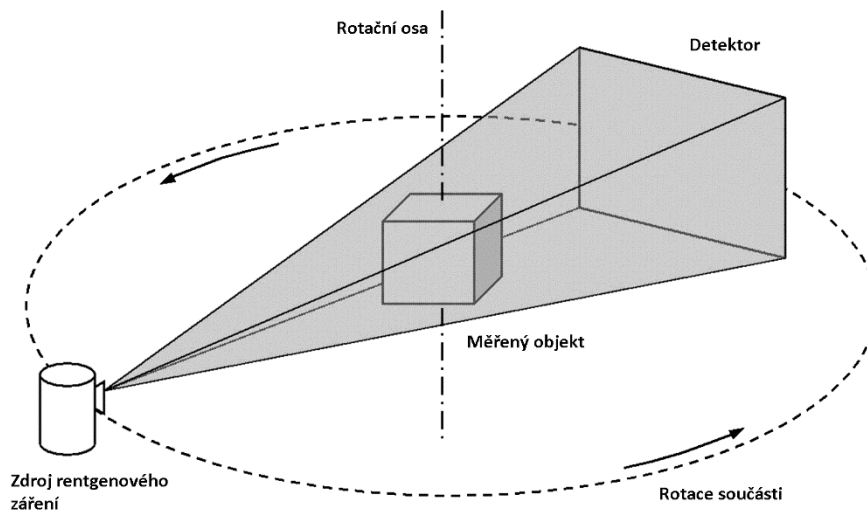
Obr. 1-28: Cross scanner Nikon XC65Dx [36]

Rentgenová metoda – počítačová tomografie

Počítačová tomografie (Computed Tomography) umožňuje využívat rentgenové záření při měřeních a vytvářet virtuální řezy snímaného tělesa, aniž by byla nutná jeho destrukce. PC tomografie kombinuje možnosti rentgenu a souřadnicového měřicího stroje. Zde je největší přínos a hlavní využití této metody. Data pořízená tomografem obsahují informace jak o povrchu, tak o vnitřní stavbě součásti (například zjištění vnitřních tvarů a dutin, porozita odlitků), které nelze získat běžnými metodami měření bez destrukce součásti. Dále je možné z objemových dat zkonstruovat CAD model. Tomograf tedy lze využít i pro reverzní inženýrství.

Princip měření je zobrazen na obrázku 1-29. Mezi zdrojem rentgenového záření a detektorem se otáčí kolem svislé osy měřený objekt. Během rotace se v jednotlivých krocích snímají rentgenogramy (stovky 2D řezů), které vhodným propojením vytvoří 3D obraz měřené součásti. Vznikne tak virtuální model, který můžeme libovolně natáčet, přezkušovat jeho jednotlivé řezy (2D) a celek podrobit dalším analýzám [37, 38].

Tomografy určené pro strojírenské měření jsou ve srovnání s výše popsány metodami značně nákladné. Další omezení je v aplikaci tomografu na materiál součásti. Materiály s vysokou hustotou (například kovy) omezují oblast použití, protože tomografy nemají dostatečný výkon k prozáření. Pořizovací cena, zároveň cena provozu tomografu a materiálové požadavky (v závislosti na rozměru a hustoty materiálu součásti) omezují využití této metody.



Obr. 1-29: Princip počítačové tomografie [37]

1.2.3 Porovnání kontaktního a bezkontaktního (laser scanner) měření

Bezkontaktní snímání bodů pomocí laser scanneru má oproti kontaktním metodám řadu výhod, které jsou ovšem vždy doprovázeny konkrétním omezením. Porovnání obou metod je znázorněno v tabulce 1-2. Výrobce scannerů vždy uvádějí hlavní výhody (produktivita, detailnější zaznamenání součástí, atd.), ovšem nezmiňují se o negativních aspektech. Produktivita scanneru při snímání bodů je podstatně vyšší, ale analýza mraku bodů je náročnější proces než analýza jednotlivých bodů. Dále nastává komplikace při skenování tvarově náročných součástí. Scanner sice umožňuje produktivnější sběr dat, ale nezvládne naskenovat celistvý povrch v případě, že jsou některé povrchy součástí zastíněny. Scanner eliminuje vliv síly dotyku dotekového senzoru (eliminace síly je důležitá při měření měkkých materiálů, například plastů), ale vnáší do měření nekorektní data v podobě šumu a odrazu paprsku (odlehle hodnoty měření), které je nutno filtrovat. Automatizaci umožňují obě porovnávané metody. Vytvoření partprogramu, od sejmutí prvního bodu až po tisk výstupního protokolu, je u kontaktního měření podstatně jednodušší úloha. Automatizace analýzy jednotlivých bodů a jejich přiřazení ke konkrétním útvarům zdaleka není tak náročný proces jako analýza mraku bodů. Analýza mraku vyžaduje kvalifikovanou obsluhu a ve většině případů i více času.

Tabulka 1-2: Porovnání kontaktních metod měření s laser scannerem

	Kontaktní měření	Laser scanner
Produktivita měření	Několik bodů/s	Až statisíce bodů/s
Přesnost měření	Řádově tisíce mm	Řádově setiny mm
Pořizovací cena	Nižší	Vyšší
Analýza měřených dat	Méně náročná	Náročnější
Automatizace	Ano	Ano
Vliv síly při měření	Ano	Ne
Náchylnost na odlehle hodnoty	Méně náchylné	Podstatně náchylné

Závěr kapitoly

Dnes má zákazník k dispozici širokou škálu sortimentu měřicí techniky. Při výběru měřicího zařízení je důležité důkladně analyzovat výrobní portfolio společnosti a tomu přizpůsobit měřicí zařízení. Za důležité faktory při výběru zařízení považují: Rozměry vyráběných součástí, požadovaná přesnost, produktivita, požadovaný výstup měření (klasický protokol, barevná mapa odchylek skutečné součásti od CAD modelu) a v neposlední řadě pořizovací cena zařízení.

2 Reverzní inženýrství, postup a typické úlohy

Pojem reverzní inženýrství je překlad z anglického reverse engineering (RE) a lze volně přeložit jako zpětné inženýrství. Jedná se o proces analyzování již hotové součásti (předmětu, softwaru) s cílem vytvoření stejně či podobně fungující součásti. Technologie spočívá v opětovném vytvoření součásti, nebo odhalení principu funkce zkoumané součásti. Ne vždy se jedná o kopii stejné součásti. RE lze využít také pro upravenou součást s odlišnými parametry [22, 23].

U běžného postupu výroby je prvním krokem návrh vyráběné součásti. Spolupráce mezi konstruktérem a technologem vede k vytvoření CAD modelu a výkresové dokumentace součásti. Následuje návrh postupu výroby a samotná výroba. Finálním krokem je kontrola výrobku a jeho porovnání s nominálními hodnotami. U RE je tomu naopak. Součást již musí být vyrobena a zpětnou metodou se získá digitální kopie součásti a její případná optimalizace a výroba [23].

Počátky RE sahají do druhé světové války, kdy jednotlivé národy kopírovaly technologie mezi sebou. Na bojišti, či špionáží byly získány základní informace a data o součásti a následně zkopírovány pro bojové účely. Typickým představitelem RE z druhé světové války je ruský bombardér Tupolev Tu-4, který je věrnou kopií amerického bombardéru B-29. Jejich podobnost ukazuje obrázek 2-1.



Obr. 2-1: Podobnost Tu-4 (vlevo) a B-29 (vpravo) [25, 26]

2.1 Oblasti využití

RE je stále se rozvíjející a produktivní technologií, kterou využívá nejen strojírenské odvětví. Princip hlavní úlohy RE pro vybraná odvětví lze popsat takto:

Strojírenství

Pomocí využití metod snímání bodů na neznámých tvarech lze získat informace pro zpětnou tvorbu dokumentace dílů, od kterých byla dokumentace ztracena nebo nebyla dodána (jednak výkresová dokumentace, ale v dnešní době spíše parametrický CAD model součástí). Dále lze znovu vytvořit dokumentaci pro díly strojů, jejichž výrobce již například zanikl a nebylo by možné udržovat v provozu jinak fungující zařízení po výpadku způsobeném jediným prvkem sestavy a jeho nedostupnosti k opravě nebo výměně kus za kus. Nebo také při dokončování dílů, kde je potřeba aktualizovat například postupně doladovaný tvar povrchu tvořící finální správný výsledek.

Stavebnictví a architektura

Do RE ve stavebnictví a architektuře lze zařadit zaznamenání například historických budov (rekonstrukce 3D modelu skutečného objektu), automatizace modelování pro stavební parcely, výstavba železnic, plynovodů, atd.

Informatika

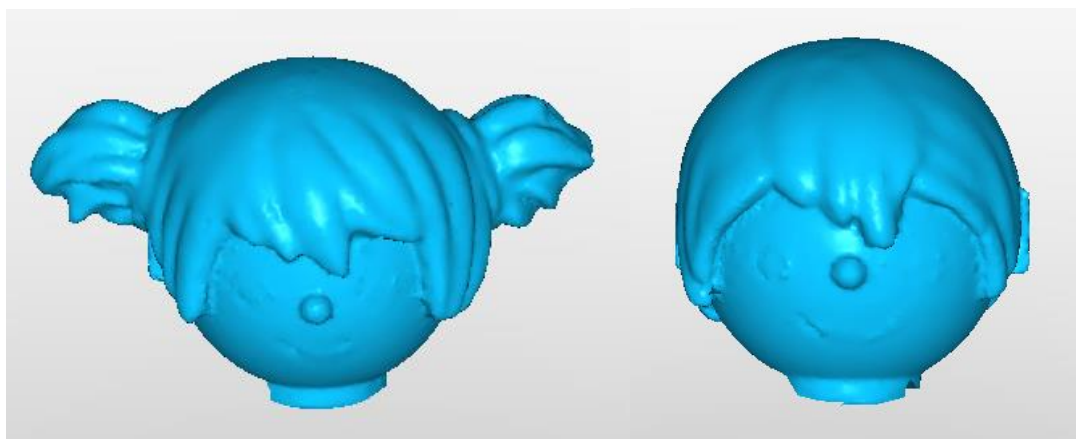
RE je definováno jako: „*Proces analýzy předmětného systému s cílem identifikovat komponenty systému a jejich vzájemné vazby a/nebo vytvořit reprezentaci systému v jiné formě nebo na vyšší úrovni abstrakce*“ [24].

Dle definice se RE zabývá pouze inspekcí systému. Změny v systému a jeho restrukturalizace do této oblasti nespádají. RE je často používáno během změn původního systému. V tomto kontextu se rozlišují dva druhy činností - restrukturalizace a reinženýrství. Restrukturalizace se zabývá transformací systému z jedné reprezentace do jiné, na stejné úrovni abstrakce. Funkce systému se při restrukturalizaci nemění. Za restrukturalizaci je považováno i nové naprogramování modulu poté, co byl revidován návrh. Reinženýrství (renovace) provádí zásahy a změny do reálného systému nebo do dokumentů na příslušné úrovni abstrakce. Pokud je renovace prováděna na vyšších

úrovních (např. v požadavcích nebo na úrovni návrhu), pak samozřejmě následuje přímé inženýrství, které změny šíří do nižších úrovní [24].

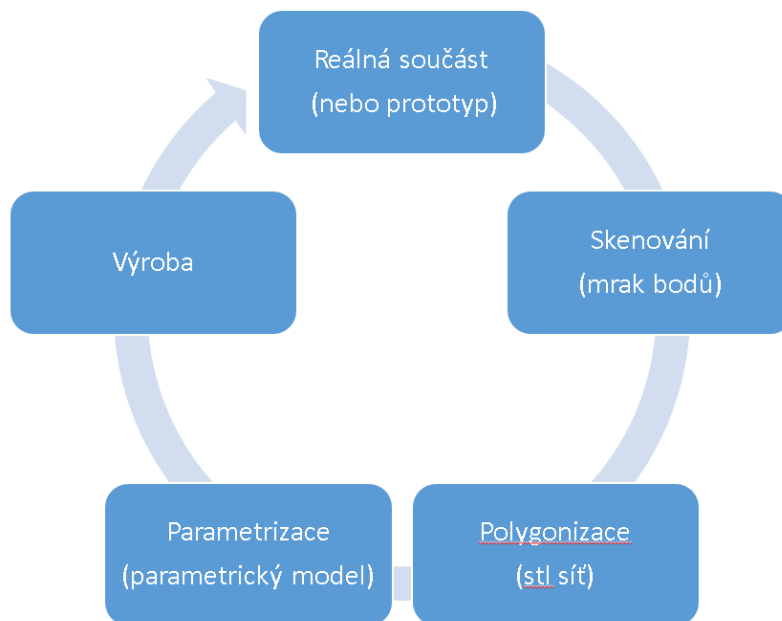
Design

Design je v dnešní době nedílnou součástí podpory prodeje (marketingového pojetí) společností. Z větší části se design tvoří ve fázi konstruování a modelování výsledného produktu (tvorba CAD modelů). Ovšem v některých případech je výroba řešena vytvořením prototypového modelu například modelářskou hmotou a finální produkty určené pro trh jsou kopií tohoto modelu. V takovém případě je RE ideálním mechanismem pro vytvoření CAD modelu z prototypu. Na obrázku 2-2 je znázorněn naskenovaný prototyp panáčka Igráčka. Výrobce si nechal u modeláře vymodelovat vlasy na panáčky, které byly následně skenovány laser scannerem. Vzniklý mrak bodů mohl posloužit k tvorbě CAD modelu a následné sériové výrobě.



Obr. 2-2: Skenovaný prototyp Igráčka

2.2 Postup reverzního inženýrství



Obr. 2-3: Postup reverzního inženýrství

Postup RE ve strojírenství popisuje obrázek 3-3.

Reálná součást

Na začátku RE je pokaždé již vyrobený reálný produkt, a to vyrobená součást s technologickým postupem výroby, či prototypový kus.

Extrakce bodů ze součásti

Následuje operace sběru dat. Extrakcí bodů z povrchu součásti jsou získány základní data pro RE. Vzhledem k velkému množství bodů (při skenování povrchu) je potřeba skenovaná data filtrovat a optimalizovat pro korektní vytvoření polygonové sítě metodou proložení bodů trojúhelníkovými plochami. V případě laserového skenování je nutné odstranit nevhodné body, které nesouvisí s povrchem součásti. Tyto body vznikají odrazivostí paprsku laseru, šumem, překrytím bodů při skenování určitého místa z více poloh scanneru, ale i naskenováním upínacího zařízení součásti.

Polygonizace

Další operací je tvorba polygonové sítě z připraveného mraku bodů. Polygonová síť se vytvoří metodou geometrické triangulace, která proloží každé tři nejbližší body mraku bodů trojúhelníkovou plochou. Z nativního formátu měřicího sw lze exportovat jak mrak bodů, tak síť. Data je možné exportovat v různých přenosových formátech (stl, txt - xyz, pol, formáty pro konkrétní sw, atd.). Do této fáze obvykle postačí měřicí software, který obsahuje funkce pro práci s mrakem bodů, vytvoření sítě a případně optimalizaci a základní vyhlazení sítě. Pro operaci parametrizace je nutné použít další software, či nastavbové moduly programu.

Parametrizace

Vytvořená polygonová síť sebou nese informace o povrchu součásti. Lze si jí představit jako povrchovou již uzavřenou obálku, která je definována prostorovými souřadnicemi a normálovými vektory (vektory jsou k dispozici jen u některých přenosových formátů). Stále ovšem nejsou plochy na součásti jasně definovány parametrickými rovnicemi, jako je tomu u parametrických CAD modelů. Povrch je tvořen napojenými trojúhelníkovými elementy. Pro účel parametrizace digitálních dat součásti slouží konkrétní sw (Polyworks, Geomegic, Rhinoceros, atd.), či nastavbové moduly konstrukčních sw, které umožňují práci s polygonovou sítí.

Parametrizace umožňuje plně konfigurovat konstrukci modelu a design součásti. Propojení je důležitou funkcí pro digitální simulace, pevnostní analýzy a zkoušky provozních podmínek. Náčrt je tvořen skupinou 2D elementů, které jsou určeny geometrickými a rozměrovými vazbami. Při konstruování modelu v konstrukčních sw se z 2D náčrtu vytváří model součásti funkcemi tažení a rotace, čímž je získán 3D prostorový model součásti [27].

Parametrizaci v RE je oproti tomuto postupu odlišná.

- **Tvorba křivek**

Základem je polygonová síť, na které se pomocí sw funkcí konstruují ohraničující křivky. Tyto vytvořené křivky se následně nechají promítnout (napasovat) na polygonovou síť. Křivky je vhodné konstruovat dle složitosti součásti s patřičnou hustotou rozmístění (na

tvarově jednoduchých plochách menší hustota a na tvarově složitých plochách větší hustota křivek).

- **Tvorba NURBS ploch**

Z vytvořených křivek se postupně vytváří NURBS plochy. Plocha může být vytvořena jen tehdy, pokud jsou křivky uzavřené. NURBS patch je funkce sw, která na ohraničené ploše (vytvořené hraničními křivkami) vypočítá a vytvoří NURBS křivky, které reprezentují povrch polygonové sítě součásti. Z těchto křivek, které mají danou parametrizaci, sw zkonstruuje parametrické plochy.

NURBS (neuniformní racionální B-spline) křivka je konstruována jako aproximační křivka, která neprochází zadanými řídicími body. Tato metoda se využívá k vyhlazení naměřených dat zatížených chybou měření. Pokud ale pracujeme s přesnými daty, je účelné modelovat interpolační křivku, která danými body, v tomto případě tzv. definičními body, prochází [28].

- **Model součásti**

V závěrečné fázi parametrizace již zbývá sestavit finální parametrický model součásti z parametrických ploch, které se na sebe napojí s příslušnou spojitostí. Hotový model se exportuje z nativního formátu do přenosového formátu. Základní přenosné formáty mohou být IGES, STEP, atd.

Výroba

Poslední operací RE může být opětovná výroba součásti (výroba nemusí být v RE zahrnuta, ve většině případů končí RE vytvořením parametrického modelu). V tomto kroku se postupuje stejně jako při klasické strojírenské výrobě, protože již je k dispozici CAD model a výkresová dokumentace. Mimo běžných metod výroby jako jsou obrábění, tváření, odlévání, atd. je vhodné zmínit technologii rapid prototyping, která umožňuje vytvářet vnitřní a vnější tvary součástí. Jde o skupinu technologií pro rychlou výrobu součástí, které mají i mechanické vlastnosti a jsou velmi podobné finální součásti. Nejčastěji se využívají k výrobě prototypu dané součásti (ve specifických případech mohou dokonce nahradit samotný výrobek). Hlavní výhodou pro použití této technologie při RE je úspora času. Přímou výrobou kompletní součásti s přibližně požadovanými

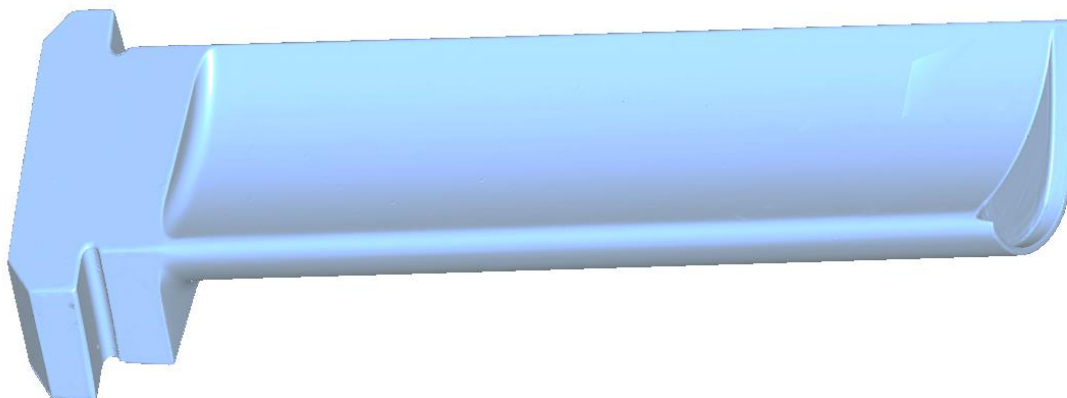
parametry lze výrobek dodat zákazníkovi (případně zavést na trh) za kratší časový úsek než při klasických technologiích výroby. Spolu provázanost reverzního inženýrství a rapid prototypingu je v dnešní době velmi se rozvíjející [29].

Závěr kapitoly

V této kapitole jsem popsal základní princip reverzního inženýrství, obory jeho využití a teoretický postup při zpracování úlohy reverzním inženýrstvím. V následující kapitole se věnuji postupem RE na reálné součásti.

3 Praktická ukázka postupu reverzního inženýrství na konkrétní součásti

V třetí kapitole své práce se věnuji praktické ukázce postupu RE na reálné součásti. Námětem na sepsání této problematiky mi byla úloha z praxe. Oslovila mne společnost Metal3D zabývající se 3D tiskem kovových i nekovových součástí. Požadovali naskenování turbínové lopatky, která je znázorněna na obrázku 3-1. Výstupem RE měl být parametrický model součásti a polygonová síť, kterou by bylo možné importovat do sw pro 3D tisk.



Obr. 3-1: Tvar reálné součásti – lopatka do turbíny

3D tisk součásti a tím i RE si zákazník zvolil z důvodu, který popisuji v teoretické části práce. Jedna z lopatek v turbíně byla mechanicky poškozena a zákazník neměl na skladě náhradní kus. Turbína nebyla z tohoto důvodu schopna provozu a byla odstavena. Každá hodina odstaveného zařízení znamená finanční ztrátu. Prodleva mezi odstavením zařízení a dodáním náhradního kusu byla velická a pro zákazníka představovala značnou finanční ztrátu. Celý proces RE není levná záležitost, ovšem v porovnání se vzniklou ztrátou z odstavení zařízení je stále finančně výhodnější. Lopatka vyrobená metodou 3D tisku nemůže kvalitativně nahradit součást vyrobenou běžnou metodou, avšak po dobu časové prodlevy může tuto součást nahradit.

Lopatku považuji za vhodnou součást pro ukázkou postupu RE, protože obsahuje rovinné plochy i volné tvary. Z tohoto důvodu lze na součásti ukázat obě metody parametrického modelování z polygonové sítě.

Cíl kapitoly

Při RE jsem postupoval chronologicky stejným způsobem, jako popisuji ve druhé kapitole a výstupem mé praktické úlohy jsou tyto body:

1. Skenování součásti laser scannerem – Focus (mrak bodů)
2. Vytvoření polygonové sítě – Focus (STL)
3. Vytvoření parametrické sítě – Polyworks (STEP)

Následující podkapitoly tedy věnuji detailnímu popisu svého postupu.

3.1 Skenování

V prvním kroku mám k dispozici reálnou součást. Pomocí snímacího systému laser scanneru extrahuji body ze součásti naskenováním celého tvaru lopatky. První komplikace nastává při prvním pokusu o sběr dat. Lopatka má plochy leštěné, a proto je potřeba součást zmatnit nástřikovým sprejem. Bez nanesení spreje není scanner schopen zaznamenat potřebný počet korektních bodů.

Dále je nutné vymyslet vhodný systém pro upevnění součásti. Pro RE je důležité, aby byl povrch naskenován celistvě. Chybějící data by následně způsobila necelistvost polygonové sítě a následně i parametrického modelu. Rozhodl jsem se pro skenování součásti z jednoho upevnění, následně součást otočit o 180° a skenovat z druhého upevnění. Na obrázku 3-2 jsou vidět oba naskenované mraky bodů.



Obr. 3-2: Pořízené skeny lopatky ze dvou upevnění

Spojení mraků

Pořízené mraky bodů spojíme softwarově metodou best-fit. Aby bylo možné oba skeny spojit do jednoho, musí být na obou skenech zaznamenány společné tvary, či plochy na lopatce. Společné tvary musí zajistit vyrovnání obou skenů ve všech šesti stupních volnosti. Pro metodu best-fit není potřeba detekovat útvary z mraku bodů, ale společné tvary musí zajistit vyrovnání pro tři posuvné pohyby (x , y , z) a tři rotační pohyby (r_x , r_y , r_z).



Obr. 3-3: Spojené mraky bodů metodou best-fit

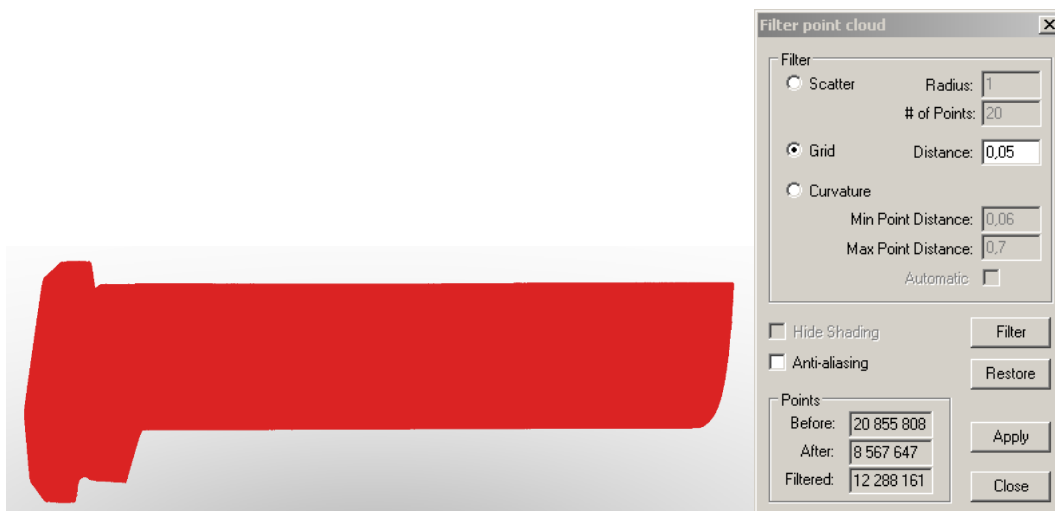
Mraky se podařilo vyrovnat a spojit. Na obrázku 3-3 je vidět spojený mrak bodů. V této fázi mám k dispozici základní data pro RE. Práce se sw není komfortní, protože mrak obsahu obrovské množství dat. Sw neběží plynule i na výkonném PC. Veliký počet bodů je následkem zvolených parametrů skenování. Abych součást zachytil detailně na všech plochách a přechodových oblastech, volil jsem pro každou skenovanou dráhu malý krok mezi zaznamenávanými liniemi. Výsledkem je detailně naskenovaný povrch, ovšem zbytečné množství bodů. A to má za následek zhoršenou práci se sw.

3.2 Polygonová síť

Následujícím krokem volím filtraci mraku bodů před vytvořením polygonové sítě. Data budu filtrovat nejdříve nejjednodušším filtrem, který sw Focus umožňuje, a to rastrovým filtrem. Tento krok volím z důvodu, že pořízený mrak bodů obsahuje přes 21 milionů bodů. Rastrový filtr využiji ke snížení počtu bodů, aby následná filtrace křivkovým filtrem nebyla softwarově tolik náročná. Parametr filtru nastavím tak, aby celkový počet bodů klesl pod 10 milionů. Následně budu mrak filtrovat křivkovým filtrem, který taktéž sníží počet bodů. Křivkový filtr ovšem nevybírá body, které budou z mraku odstraněny, náhodně. Dle zadaných parametrů filtrace mohou zvolit minimální a maximální vzdálenost sousedních bodů v mraku. Body v mraku jsou dále klasifikovány dle křivosti vůči sousedním bodům.

Filtrace mraku bodů

Nejdříve mrak přefiltruji rastrovým filtrem. Jediný parametr, který mohu nastavit, je šířka strany krychle (vysvětlení v teoretické části práce). Abych se dostal pod hodnotu 10 milionu bodů, volím šířku strany krychle 0,05 mm. Z původního mraku, který obsahoval téměř 21 milionů bodů, je odfiltrováno více než 12 milionů bodů. Výsledný mrak, po filtraci rastrovým filtrem, obsahuje přibližně 8,5 milionů bodů. Tento počet je vhodný pro křivkový filtr.



Obr. 3-4: Rastrový filtr mraku bodů

Nyní je mrak připraven pro křivkový filtr. U křivkového filtru se pokusím najít vhodnou kombinaci parametrů minimální a maximální vzdálenosti sousedních bodů tak, aby bylo z mraku odstraněno co nejvíce bodů při zachování detailního popisu součásti.



Obr. 3-5: Křivkový filtr mraku bodů

Nastavením parametru minimální vzdálenost bodů rovna 0,06 mm a maximální vzdálenost bodů rovna 0,7 mm je z mraku odstraněno téměř 8,4 milionu bodů. Výsledný mrak po filtraci bude obsahovat přibližně 177 tisíc bodů. Takto zvolené parametry považuji za korektní, protože počet bodů klesl na přijatelné minimum a detaily lopatky zůstaly zachovány.

Křivkový filtr uvažuje při filtraci křivost jednotlivých bodů. Z tohoto důvodu se nejvíce bodů odfiltrovalo na hladkých plochách a v zakřivených místech zůstalo bodů více, jak můžeme vidět na obrázku 3-5. Tento krok je důležitý pro vytvoření hladké polygonové sítě.

Vytvoření polygonové sítě

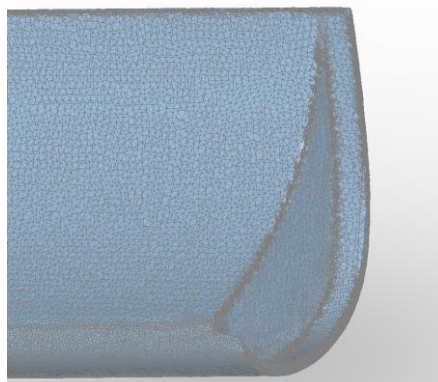
Přefiltrovaný mrak bodů je nyní připraven pro vytvoření polygonové sítě. Polygonová síť se formuje metodou geometrické triangulace, která proloží každé tři nejbližší body mraku bodů trojúhelníkovou plochou. Tyto plochy jsou na sebe napojeny se základní spojitostí, ovšem jsou tak malé, že je výsledná polygonová síť celé součásti téměř hladká. Pro optimalizaci a vyhlazení sítě nabízí sw Focus speciální funkci. Bohužel princip tohoto vyhlazení je know-how společnosti Nikon a na opakované prosby o popsání algoritmu funkce mi nebyla dána odpověď.

Vytvořená polygonová síť pomocí sw Focus uvádím na obrázku 3-6.



Obr. 3-6: Polygonová síť

Na obrázku 3-6 lze vidět vytvořenou polygonovou síť, která bude použita pro následující operace. Na tomto obrázku můžeme vidět téměř hladkou a celistvou síť tvořenou trojúhelníkovými polygony. Aby byl zřejmý princip geometrické triangulace, přikládám obrázek 3-7, na kterém jsou detailně vidět trojúhelníkové polygony. V odstavci o křivkovém filtru jsem zdůraznil hustější rozložení bodů na přechodových hranách součásti. Následkem toho je hustější rozložení a menší plocha polygonů v těchto místech.

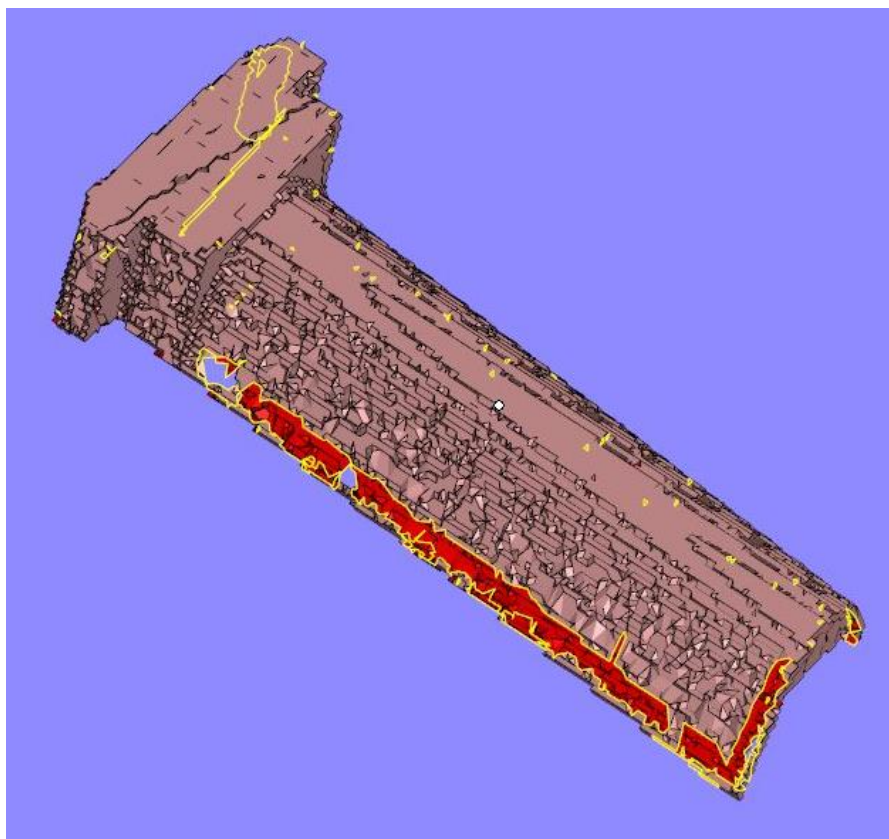


Obr. 3-7: Detail polygonové sítě s naznačenými polygony

Po konzultaci s techniky společnosti Metal3D jsem se rozhodl zkusit importovat vytvořenou polygonovou síť přímo do sw pro 3D tiskárnu. Rozhodl jsem se z toho důvodu, že vstupním formátem tohoto sw je polygonová síť. I když je k dispozici CAD model, stejně se převádí na polygonovou síť. V případě úspěšného importu sítě, vytvořené měřicím sw Focus, bych ušetřil značné množství času zákazníkovi.

Pokus o přenos polygonové sítě

Obrázek 3-8 ukazuje, jakým způsobem se síť importovala do sw pro 3D tisk. V síti chybí data, která v měřicím sw nechyběla. Dále je zřejmá destrukce sítě v místech, kde v měřicím sw byla hladká a napojení sítě z polygonů. Z tohoto důvodu nelze použít síť vytvořenou softwarem Focus.



Obr. 3-8: Destrukce sítě po importu do softwaru pro 3D tisk

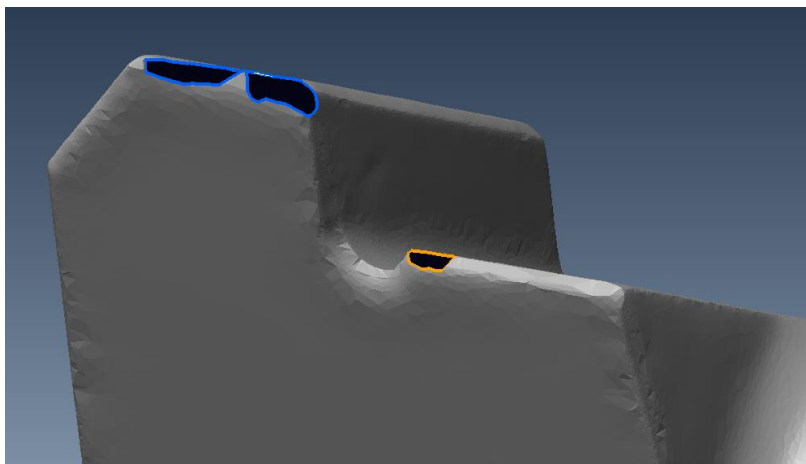
3.3 Parametrický model

Tvorba parametrického modelu již není součástí měřicího sw. Polygonovou síť přenesu do speciálního sw, který parametrizaci umožňuje, ve formátu STL. Pro účely diplomové práce mám k dispozici sw Polyworks. Existují dva možné postupy vytvoření parametrického modelu v tomto sw. První metoda je založena na detekci útvarů z polygonové sítě. Detekované útvary je následně nutné přenést do konstrukčního sw (Catia, Autodesk Inventor, Solidworks, atd.) a výsledný tvar modelu zkonstruovat pomocí funkcí příslušného sw. Druhá metoda je založena na vytvoření NURBS ploch, napasování

těchto ploch na polygonovou síť a zkonstruování modelu z těchto ploch. V následujících odstavcích představím obě metody.

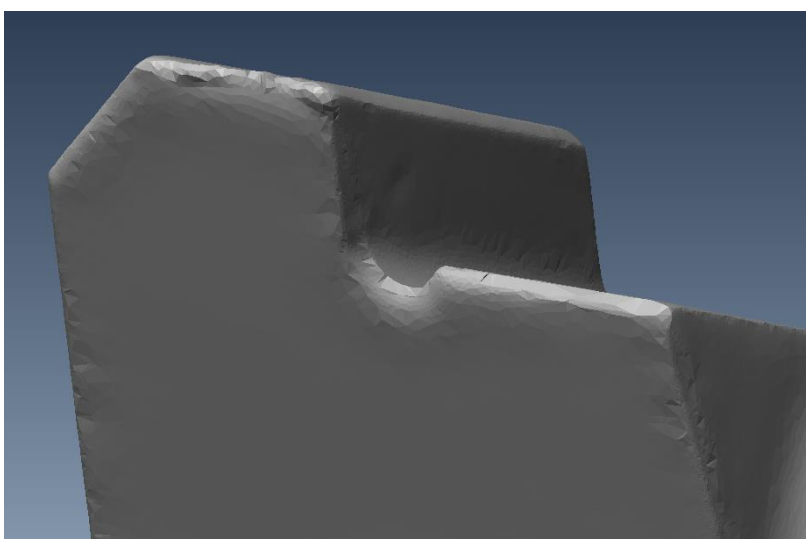
Vyplnění chybějících dat sítě

Prvním krokem po přenesení polygonové sítě je její úplné uzavření. Přenosem mezi měřicím sw Focus a sw Polyworks se na síti objevila neuzavřená místa, která jsou znázorněna na obrázku 3-9.



Obr. 3-9: Neuzavřená polygonová síť následkem přenosu sítě mezi softwary

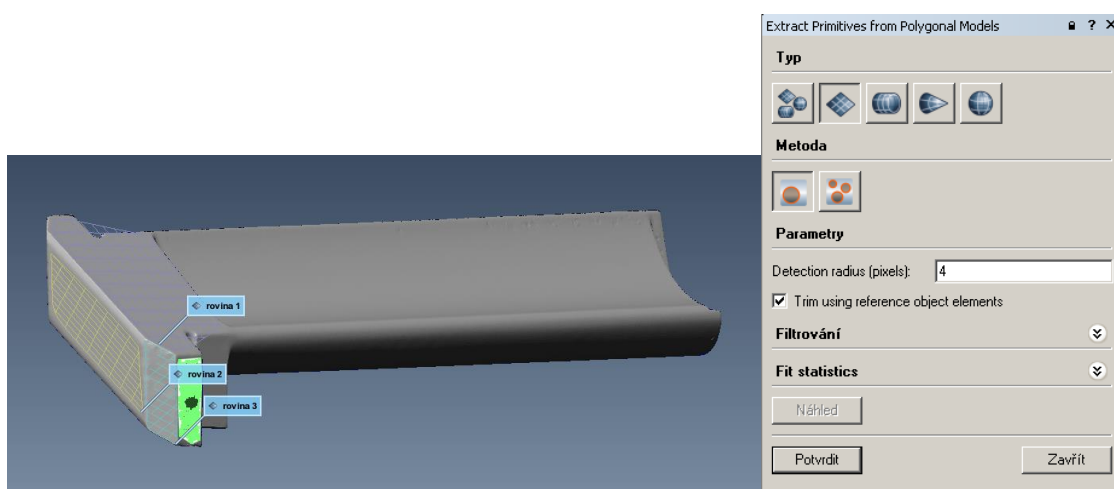
Polyworks umožňuje vyplnění těchto prázdných míst pomocí speciální funkce na doplnění sítě. Funkce sama vyhledá prázdná místa sítě. Jednoduchým vybráním a zacelením těchto míst se podařilo kompletně uzavřít polygonovou síť. Na obrázku 3-10 lze vidět doplnění prázdných míst polygonového modelu lopatky.



Obr. 3-10: Uzavření obálky polygonové sítě

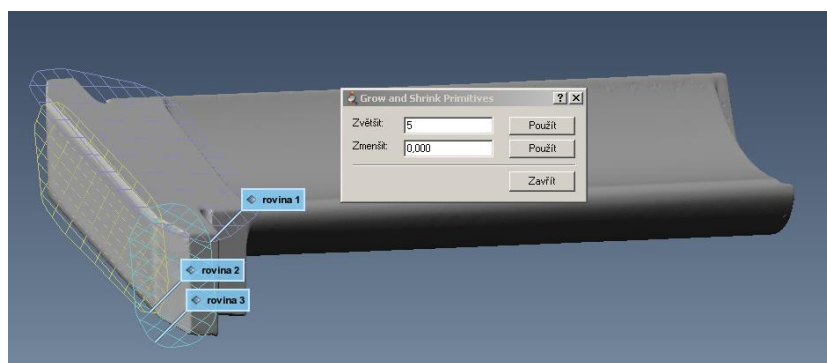
Detekce elementů

Detekci (extrakci) elementů z polygonové sítě považuji za jednodušší metodu tvorby parametrického modelu. Metoda má ovšem omezené množství elementů, které je možno detekovat (v sw Polyworks). Konkrétně jsou to elementy: rovina, válec, kužel a koule. Z důvodu tohoto omezení nemohu metodu využít pro tvorbu modelu lopatky, protože lopatka obsahuje i volné tvary. Metoda je vhodná pro součásti, které jsou tvořeny pouze z těchto elementů. Ideální součástí je například hřídel tvořena válcovými a kuželovými plochami. Pro ohraničení krajních válcových ploch se detekují rovinné plochy čela. Na polygonové síti lopatky jsem pro názornou ukázkou detekoval tři roviny v oblasti zámku lopatky. Detekované roviny ukazují na obrázku XX.



Obr. 3-11: Detekování útvarů v sw Polyworks

Sw Polyworks umožňuje pomocí jedné funkce zvětšení a zmenšení všech detekovaných elementů (obrázek 3-12). Tento krok je výhodný, protože na přenášených elementech do konstrukčního sw již budou vytvořeny průřezy těchto elementů. V konstrukčním sw by bylo nutné tvořit průřezy mezi jednotlivými elementy zvlášť.



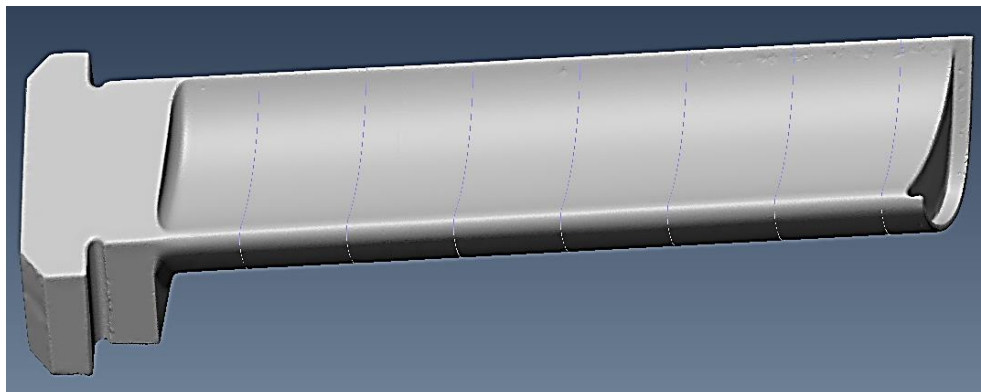
Obr. 3-12: Ukázka funkce pro zvětšení a zmenšení detekovaných elementů

Tvořením modelu pomocí této metody jsem se dále nezabýval, protože nevedla k úspěšnému splnění mého cíle. Parametrický model jsem vytvořil pomocí druhé metody.

Tvorba hraničních křivek a proložení NURBS ploch

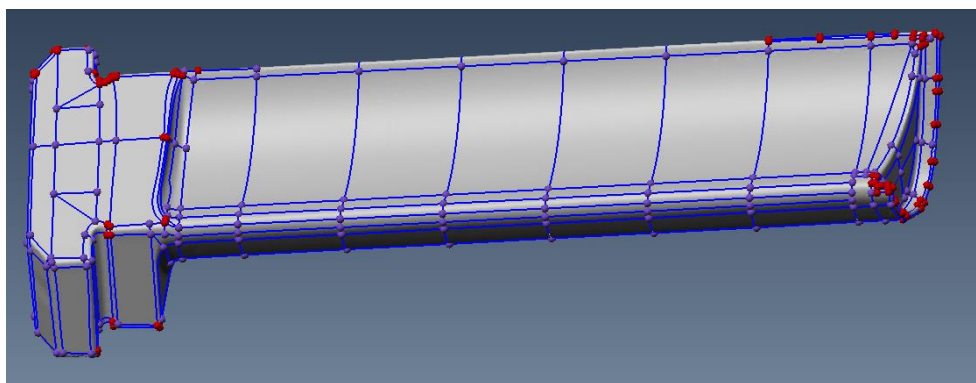
Cílem této metody je vytvořit hraniční křivky na polygonové síti a následně proložit NURBS plochy mezi těmito křivkami. Nejdůležitějším úkonem je správná konstrukce křivek, protože proložení ploch se řídí parametry právě z těchto křivek. Po úspěšném proložení ploch mezi všemi křivkami jsem je napasoval na polygonovou síť. Napasované plochy představují výsledný parametrický model.

Pro usnadnění práce s tvořením křivek jsem využil řez polygonovou sítí. Řezy jsem volil v příčném směru lopatky, jak je vidět na obrázku 3-13.



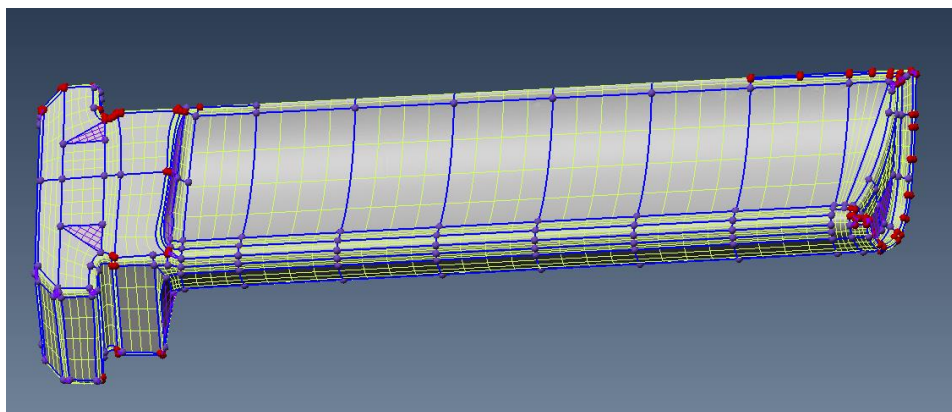
Obr. 3-13: Konstrukce řezů na polygonové síti

Křivky musí jednak dokonale kopírovat tvar sítě a dále by měly být rozloženy dle tvaru ploch na síti. Řezy mi pomohly s vytvořením křivek na základním tvaru lopatky. Křivky pro NURBS plochy jsem v této části lopatky konstruoval jako kopii 2D křivek vytvořených z polygonové sítě, ovšem s hladkým napojením na zakřivených místech. Od těchto základních křivek jsem následně tvořil další po celé síti do té doby, než byl spojen poslední uzlový bod. Kompletní propojení všech uzlových bodů je vidět na obrázku 3-14. Vzniklé elementy mezi řídicími křivkami jsou trojúhelníkové, obdélníkové a v některých částech lopatky i polygonové plochy.



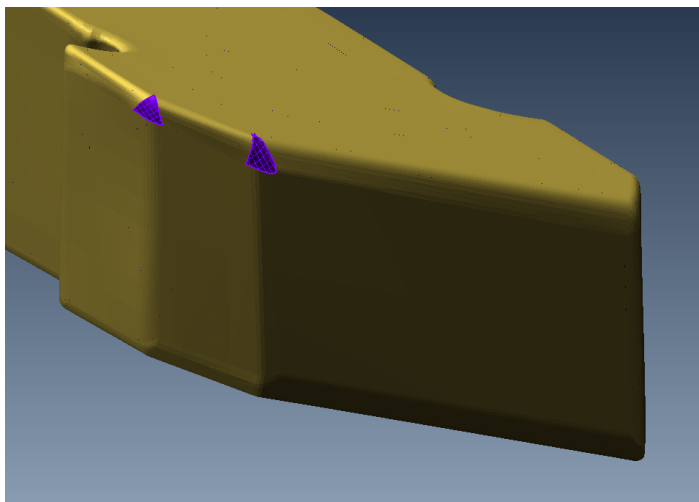
Obr. 3-14: Konstrukce křivek na polygonové síti

Spojením uzlových bodů jsem vytvořil mezi křivkami plošné elementy, jež jsem nechal proložit NURBS plochami. Každou NURBS plochu si sw rozsegmentoval na řídicí křivky, které se snažil (kde to bylo možné) napojit mezi jednotlivými plochami. Tvarově složitější části lopatky rozdělil na více segmentů než jednodušší, proto není napojení úplné. Ve specifických případech jsem musel vytvořit menší elementy, než bylo nutné, aby bylo možné spojit všechny uzlové body. Bez spojených uzlových bodů sw nedokázal zkonstruovat NURBS plochu. Celá součást pokryta plochami je vidět na obrázku 3-15.



Obr. 3-15: Vytvoření NURBS ploch z hraničních křivek

Následujícím krokem bylo napasování NURBS ploch na polygonovou síť a vytvoření parametrického modelu. První pokusy nebyly úspěšné, protože sw nedokázal napojit jednotlivé plochy. Příčinou byly mnou chybně vytvořené hraniční křivky. Nejvíce se tento problém vyskytoval na přechodových místech tří ploch, jak ukazuje obrázek 3-16.

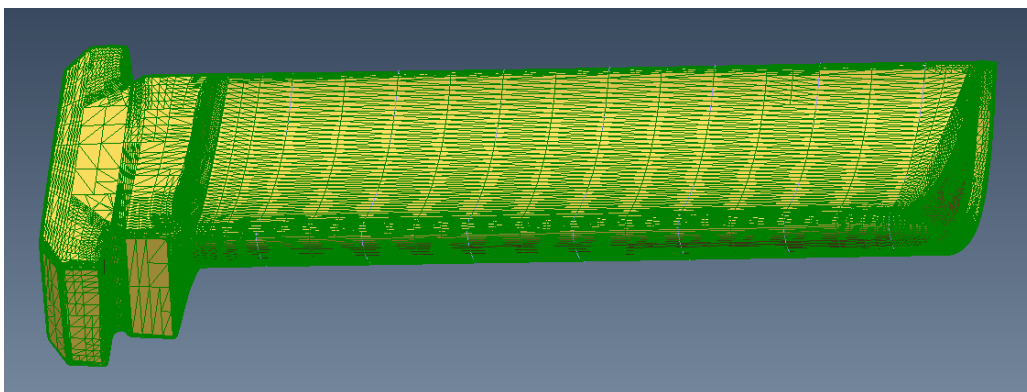


Obr. 3-16: Chybně napojené NURBS plochy

Do těchto míst jsem dokreslil další hraniční křivky a nechal přepočítat NURBS plochy. Nakonec se mi podařilo všechny plochy úspěšně napojit a tím zkonstruovat uzavřený parametrický model z napojených ploch.

Parametrický model

Vytvořený parametrický model programem Polyworks uvádím na obrázku 3-17. Žlutá barva představuje model součásti a zeleně je vykresleno drátové zobrazení.



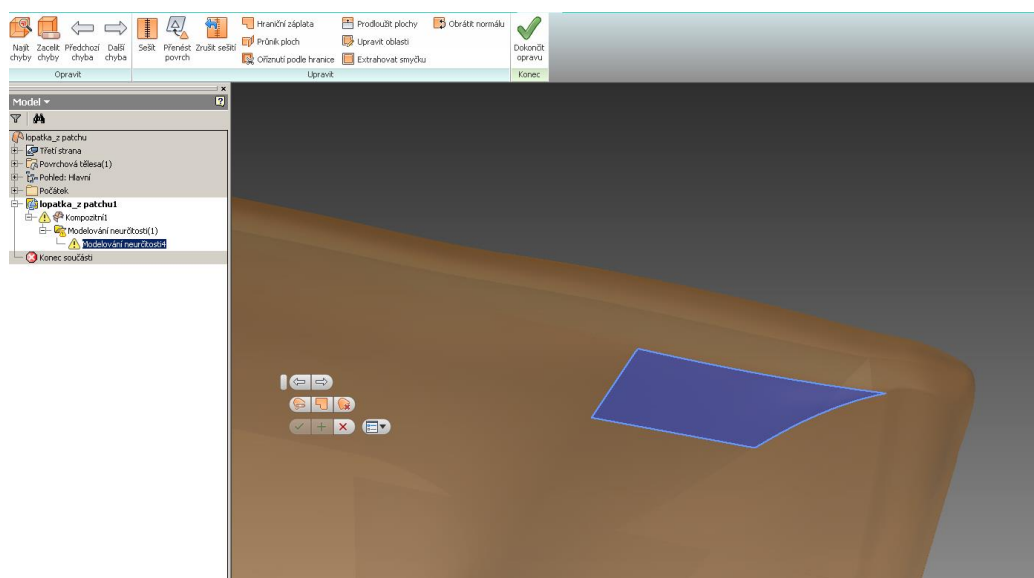
Obr. 3-17: Parametrický model v drátovém zobrazení

Při exportování modelu do přenosového formátu STEP jsem zaznamenal, že některé plochy na sebe přesně nenasazují. U parametrického modelu je důležité, aby na sebe všechny plochy navazovaly alespoň se základní C0 spojitostí. Plochy nebyly v těchto místech napojeny, ale měly mezi sebou dilatační mezeru širokou řádově v mikrometrech.

Model jsem měl již exportovaný, a proto jsem ho načel v konstrukčním sw Autodesk Inventor. Konstrukční sw obsahuje propracovanější nástroje pro práci s parametrickým modelem.

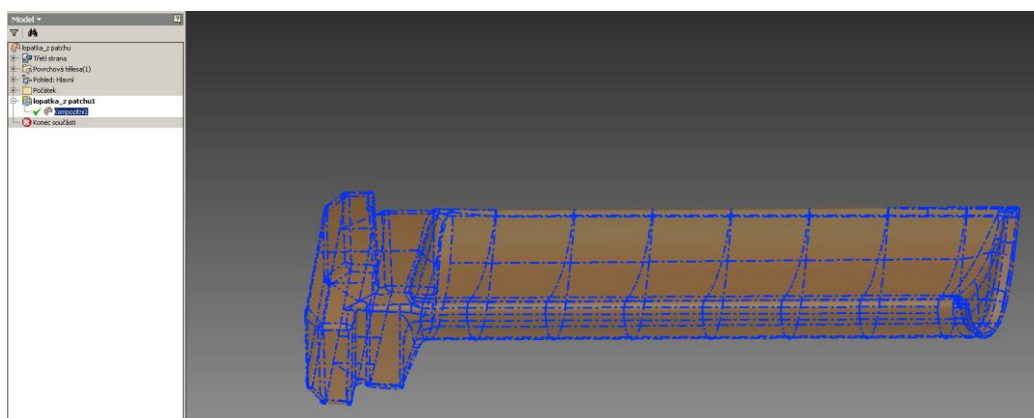
Úprava parametrického modelu v sw Autodesk Inventor

Inventor vyhodnotil parametrický model jako nekompozitní ihned po importu souboru (obrázek 3-18). Analyzoval načtený model a zobrazil všechny nenapojené plochy (některých jsem si v sw Polyworks ani nevšiml), které Polyworks vyhodnotil jako napojené.



Obr. 3-18: Úprava parametrického modelu v sw Autodesk Inventor

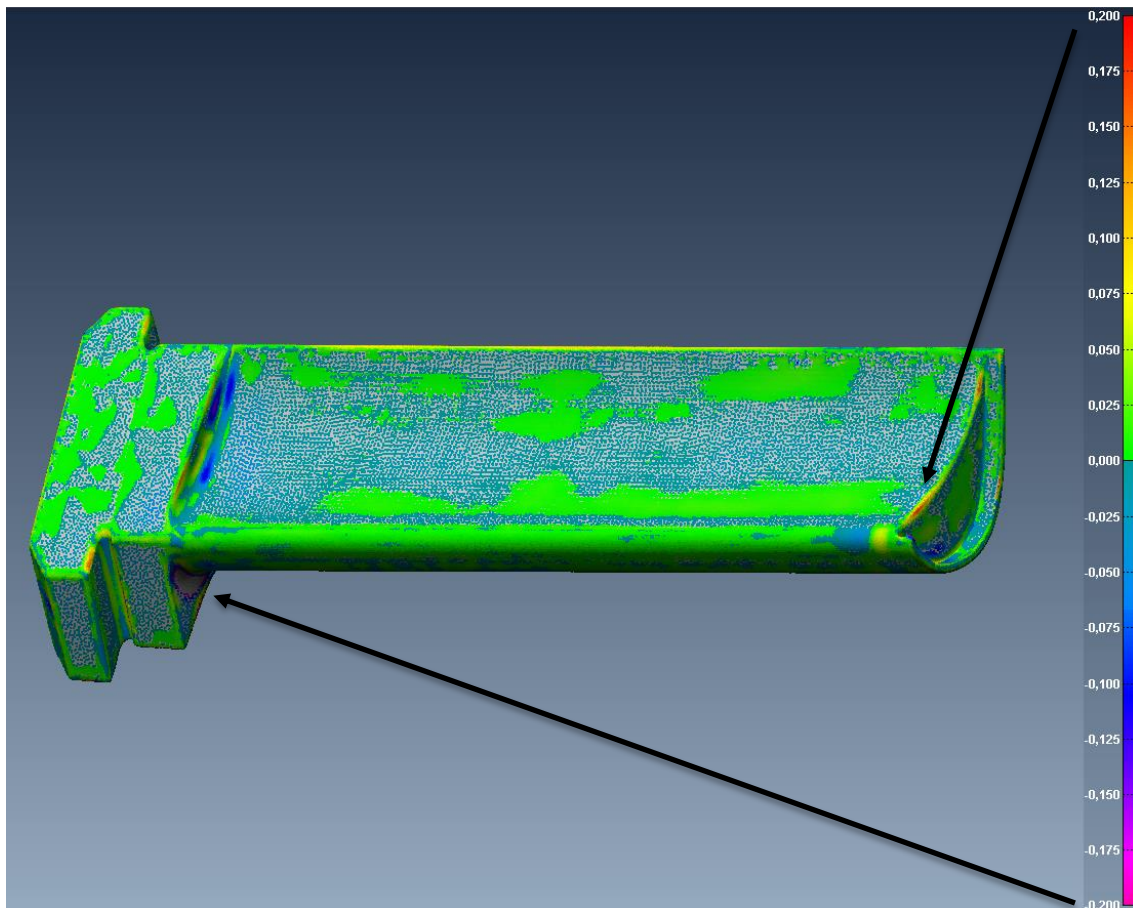
Pomocí nástroje pro úpravy a opravy modelu jsem z lopatky vytvořil kompozitní model vhodný pro následné aplikace. Uzavřený model uvádím na obrázku 3-19.



Obr. 3-19: Napojený parametrický model (kompozitní)

3.3.1 Porovnání modelu s polygonovou sítí

Abych měl představu o deformaci a rozdílu parametrického modelu oproti polygonální síti rozhodl jsem se, že opravený model zpětně načtu do sw Polyworks a provedu barevné porovnání. Vzhledem k tomu, že jsem po každém přenosu všech typů souborů (mrak bodů, polygonová síť, parametrický model i opravený model) neupravoval souřadný systém součásti, není nutné ani po tomto přenosu vyrovnávat model a síť. Globální porovnání (barevnou mapu odchylek) přikládám na obrázku 3-20.



Obr. 3-20: Barevná mapa odchylek parametrického modelu od polygonové sítě

Maximální odchylky modelu a sítě vychází $\pm 0,2$ mm. Největší kladnou a největší zápornou odchylku zobrazují vynášecími šipkami. Mimo extrémní hodnoty, které jsou na kritických přechodových oblastech modelu, je rozdíl mezi modelem a sítí v pásmu $\pm 0,05$ mm.

4 Návrh metody pro zjištění tloušťky nanesené vrstvy spreje

Při praktické úloze jsem během skenování reálné součásti narazil na problém při sběru dat. Součást je velmi lesklá a snímání bodů na součásti nebylo možné (problematiku sběru dat pomocí laser scanneru popisuji v teoretické části této práce, kapitola Laser scanner). Z tohoto důvodu bylo nutné využít zmatňující sprej. Rozhodl jsem se v rámci své práce popsat vliv zmatňujícího spreje na výslednou přesnost měření a na ovlivnění geometrických specifikací.

Stanovil jsem si tři body této kapitoly, na kterých popíšu ovlivnění výsledků měření zmatňujícím sprejem. Výsledkem mého výzkumu je:

1. Tloušťka nanesené vrstvy prášku
2. Ovlivnění geometrických specifikací
3. Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení

Abych mohl splnit všechny stanovené body, bylo potřeba vybrat vhodný matematický element a vymyslet postup experimentu. Z matematických elementů jsem vybral rovinu a dále tvarovou plochu. Na většině strojních součástí jsou tvarové plochy s přechodovými hranami a zakřivením povrchu. Z tohoto důvodu by pouze na rovinné ploše nebyl experiment objektivní. Například nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení není u roviny problematická, ale nanést vrstvu prášku na zaoblený tvar oproti tomu je. Prášek nanáší na součást operátor stroje, tudíž se do výsledku promítne nerovnoměrný pohyb ruky během nástřiku. Tvarovou plochu jsem vybral kulovou a vhodné součásti pro experiment jsem zvolil tyto:

Měřené součásti

Kontrolní prizma

Jako ideální součást s kvalitně obrobenými rovinnými plochami jsem vybral kontrolní prizma kostku (Obr. 4-1). Prizma je dostatečně tuhé, tudíž tvarově stálé. Zároveň všechny plochy, které jsem využil pro svůj experiment, jsou broušeny s malou hodnotou chyby tvaru (rovinnosti).



Obr. 4-1: Měřená součást 1 - prizma

Ložisková koule

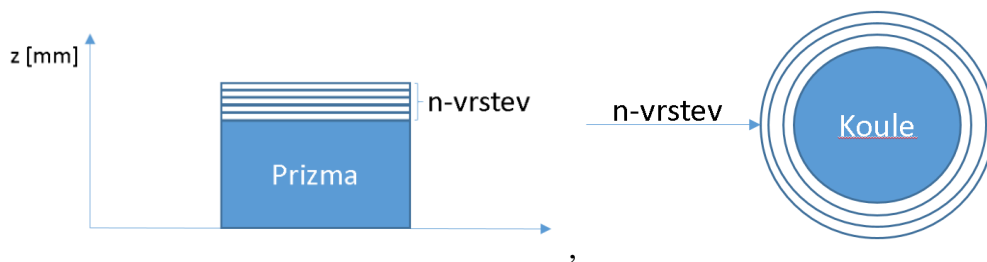
Pro experiment s tvarovou plochou (kulovou plochou) jsem vybral přesnou ložiskovou kouli. Ložisková koule se mimo svého hlavního užití v ložisku využívá jako kalibrační koule pro metrologické účely. Konkrétně pro kalibraci snímacích doteků. Aby bylo možné nasnímat mrak bodů na kouli i bez nástřikového spreje, využil jsem ložiskovou kouli s povrchovou úpravou. Společnost Topmes dříve provedla zkušební povrchovou úpravu na lesklé ložiskové kouli, která by měla sloužit pro testování při snímání bodů laser scannerem. Povrchovou úpravou bylo alkalické černění, které udělá z lesklého a stříbrného povrchu matný a tmavý. Každá povrchová úprava změní tvar a velikost součásti. Alkalické černění sice ovlivní povrch nepatrně, ale pro svůj experiment musím tento fakt brát v úvahu. Nominální hodnoty udávané výrobcem tudíž nepovažuji za korektní a stanovím si nové nominální hodnoty na přesném stacionárním CMM.



Obr. 4-2: Měřená součást – ložisková koule

Postup experimentu

Na obě součásti jsem postupně nanášel vrstvy prášku a po každém nanesení jsem součásti znovu přeměřil. Schématické znázornění postupu je vidět na obrázku 4-3.



Obr. 4-3: Nanesení spreje na součásti: vlevo prizma, vpravo koule

První bod (tloušťka nanesené vrstvy) stanovím při nanesení spreje na rovinnou plochu ve více vrstvách a budu pozorovat nárůst hodnoty souřadnice ve směru normálového vektoru roviny. U kulové plochy určím tloušťku spreje vlivem růstu hodnoty průměru detekované koule.

Pro druhý bod (ovlivnění geometrických specifikací) vypíši po každé nanesené vrstvě hodnotu rovinnosti pro prizma a hodnotu tvaru kulové plochy pro kouli. Dále jsem se rozhodl porovnat hodnotu úhlu mezi skenovanými rovinami, aby bylo zřejmé nejen ovlivnění délkových hodnot (v závislosti na tloušťce spreje), ale i ovlivnění úhlových rozměrů.

Třetí bod (nerovnoměrné nanesení prášku) určím z opakovaného nanesení jedné vrstvy prášku na kulovou plochu. Při rovnoměrném nanesení vrstvy u každého nástřiku by byla hodnota průměru koule a chyby tvaru kulové plochy přibližně stejná. Vlivem nerovnoměrné vzdálenosti spreje od součásti a nerovnoměrného nanášeného množství prášku během aplikace na součást předpokládám, že naměřím rozdílné hodnoty.

Prvním krokem bylo měření součástí na přesném CMM Carl Zeiss. Z tohoto měření jsem získal nominální hodnoty pro vyhodnocení. Následně jsem provedl měření pomocí snímacího systému laser scanneru a s nástřikem součástí zmatňujícím sprejem. Po získání všech potřebných informací jsem vyhodnotil zadané body této kapitoly. Na závěr kapitoly uvádím porovnání dotykového a skenovacího měření na speciálním elementu.

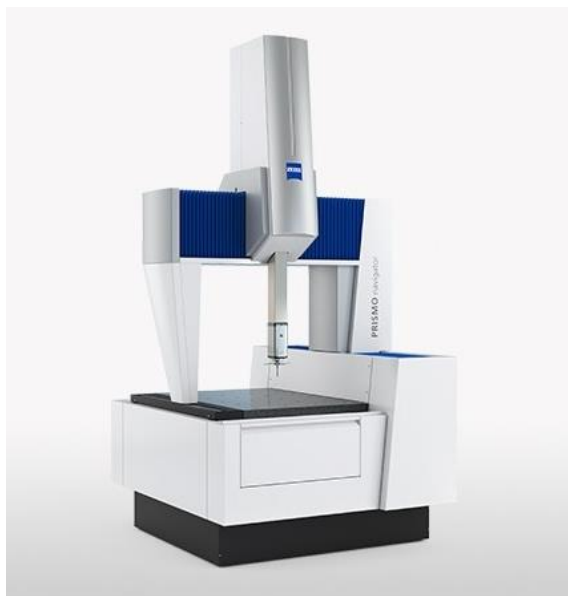
Měření nominálních hodnot (Carl Zeiss Prismo, ČVUT v Praze)

Měření nominálních hodnot jsem provedl ve spolupráci s fakultou strojní ČVUT v Praze, která má k dispozici metrologickou laboratoř od společnosti Carl Zeiss. Pro experiment mi bylo umožněno měřit na velmi přesném CMM Carl Zeiss Prismo. Všechny náměry jsem měřil dotykovou skenovací metodou.

Stroj

Stacionární mostový CMM Carl Zeiss Prismo.

Vzorec přesnosti: $MPE_e = 0,5 \pm \frac{L}{500} [\mu m]$ [20]



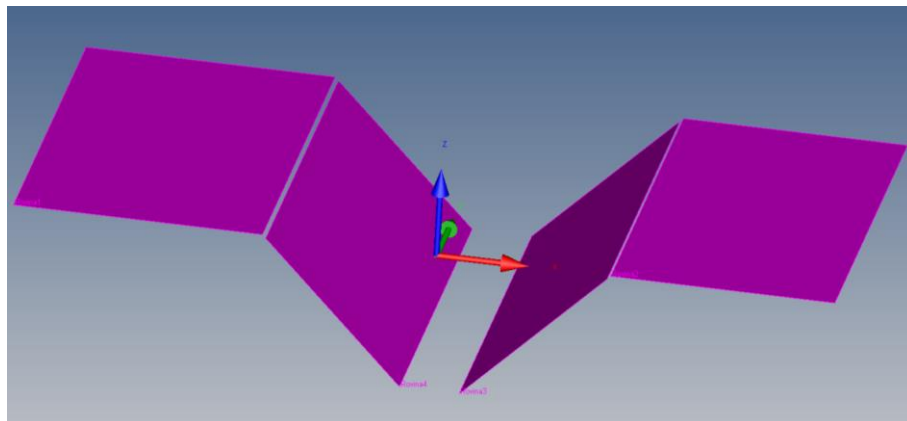
Obr. 4-4: Zeiss Prismo a analogová skenovací hlava VAST [20]

Snímací systém

Na konci pinoly je osazena analogová skenovací hlava Carl Zeiss VAST, do které je přichyceno prodloužení a snímací dotek (rubínová kulička).

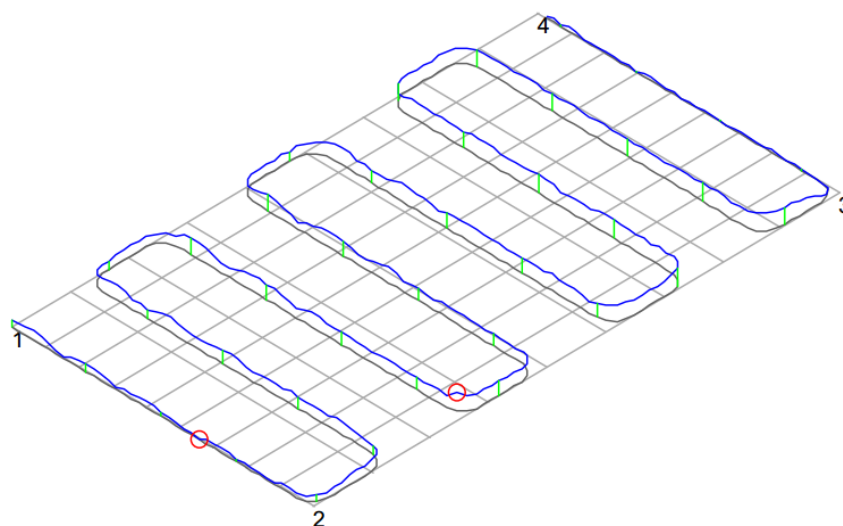
Měření prizma dotykovou metodou

Na prizmatu jsem vybral čtyři rovinné plochy, které byly následně změřeny. Vyhodnotil jsem rovinnost každé jednotlivé roviny zvlášť a úhel mezi dvěma prostředními rovinami, které jsem pojmenoval rovina 3 a rovina 4 (viz Obr.4-5).



Obr. 4-5: Vybrané roviny na prizmatu






Všechny plochy jsem měřil kontaktním skenovacím senzorem metodou (strategií) tažení polylinie po skenované rovině. Princip měření je vidět na obrázku 4-6.



Obr. 4-6: Strategie měření roviny dotykově

Výsledky měření:

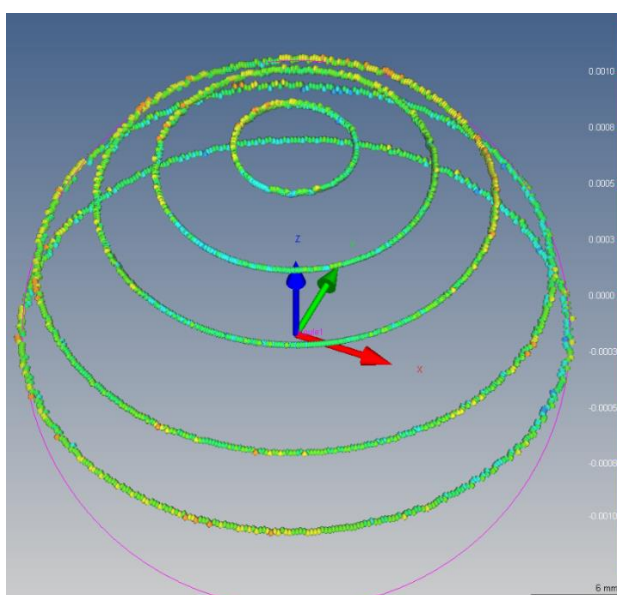
Na obrázku 4-7 uvádím výsledný protokol měření. Pojmenování geometrické specifikace souhlasí s pojmenováním rovin na prizmatu. Tedy Rovinnost 1 odpovídá geometrické specifikaci pro rovinu 1, atd. Úhel mezi elementy 1 odpovídá úhlu mezi rovinami 3 a 4, dle zadání experimentu.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Rovinnost1 0.0040	0.0000	0.0100		-- 0.0040
	Rovinnost2 0.0041	0.0000	0.0100		-- 0.0041
	Rovinnost3 0.0025	0.0000	0.0100		- 0.0025
	Rovinnost4 0.0034	0.0000	0.0100		-- 0.0034
	Úhel mezi elementy1 89.9293	90.0000	0.1000	-0.1000	-- -0.0707

Obr. 4-7: Protokol z měření prizmatu dotykově

Měření ložiskové koule dotykovou metodou



Ložiskovou kouli jsem měřil metodou kruhových drah na povrchu koule. Ke stanovení chyby tvaru kulové plochy a průměru koule bylo použito pět drah, které jsou rovnoměrně rozloženy ve vrchní části polokoule dle obrázku 4-8. Za spodní část polokoule byla ložisková koule upevněna ke granitové desce souřadnicového stroje. Souřadný systém jsem transformoval do středu koule, jak je naznačeno na obrázku. Ovšem přesun systému nebyl pro účel experimentu nutný, protože výstupem měření je chyba tvaru a hodnota průměru (pro tyto dvě charakteristiky není nutné vyrovnání součásti).



Obr. 4-8: Strategie měření ložiskové koule dotykově

Výsledky měření:

Na Obrázku 4-9 uvádím výsledný protokol měření. Tvar 1 označuje chybu tvaru kulové plochy od nominální parametrické definice koule. Charakteristika Koule 1_Průměr pak reálnou hodnotu průměru ložiskové koule. Dle popisu ložiskové koule s povrchovou úpravou (alkalické černění) nelze stanovit nominální hodnotu průměru, ani nelze považovat za korektní nominální hodnotu průměru udávanou výrobcem. Z tohoto důvodu považuji změřený průměr 34,9367 mm jako nominální hodnotu pro následující experimentální měření.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 Tvar1	0.0014	0.0000	0.0020		--- 0.0014
 Koule1_Průměr	34.9367	34.9367	0.0010	-0.0010	 0.0000

Obr. 4-9: Protokol z měření ložiskové koule dotykově

V této fázi jsem měl podklady pro vyhodnocení měření pomocí laser scanneru. Všechny hodnoty změřené dotykovou metodou považuji za nominální hodnoty měření.

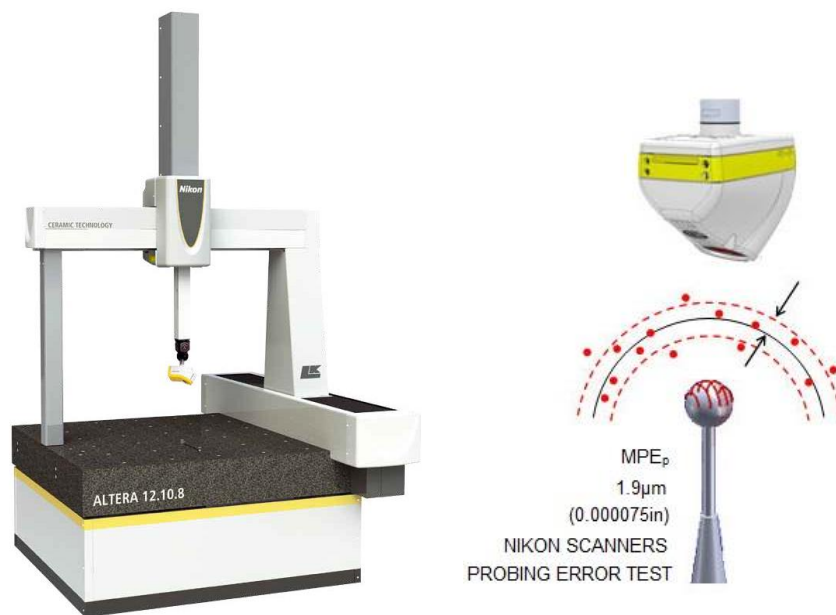
Měření aktuálních hodnot (Nikon Altera, Topmes, s.r.o.)

Měření aktuálních hodnot jsem provedl ve spolupráci se společností Topmes, s.r.o. Měření pro experiment mi bylo umožněno na souřadnicovém stroji Nikon metrology Altera (Obr. 4-10). Všechny náměry jsem měřil metodou laserového skenování (princip laserového skenování uvádím v teoretické části práce, kapitola „Laser scanner“).

Stroj

Stacionární mostový CMM Nikon metrology Altera.

Vzorec přesnosti: $MPE_e = 1,8 \pm \frac{L}{400} [\mu m]$ [11]



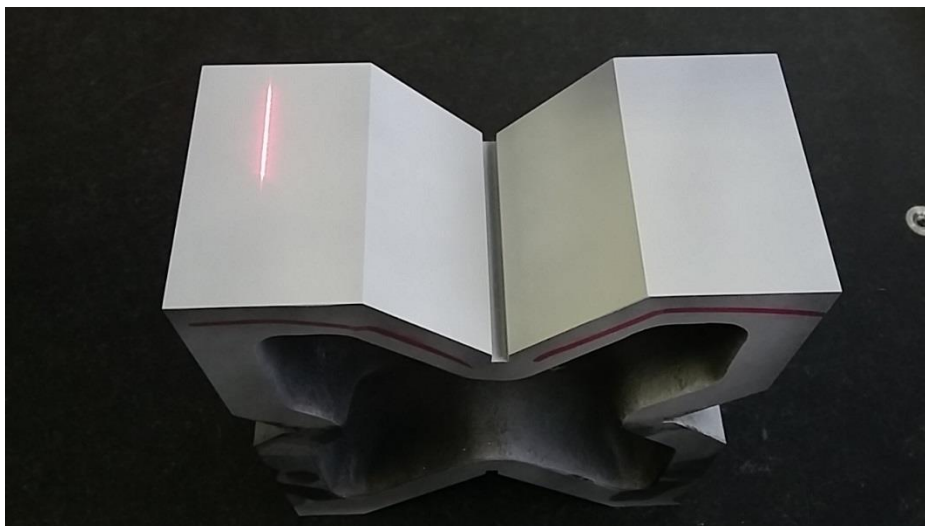
Obr. 4-10: Vlevo: Nikon metrology Altera [11], vpravo: chyba snímače LC15Dx udávaná výrobcem [16]

Snímací systém

Na konci pinoly je osazena indexovatelná hlava Renishaw PH10M+, do které je přichycen laserový scanner Nikon metrology LC15Dx. Scanner LC15Dx je momentálně nejpreciznější laser scanner od tohoto výrobce na trhu. Chybu snímače výrobce udává pod $2 \mu m$ (viz obrázek 4-10 vpravo). Ovšem při měření reálné součásti a v reálných podmínkách (přesnost scanneru sečtena s přesností stroje) dosahuje laser scanner horší přesnost až o jeden řád.

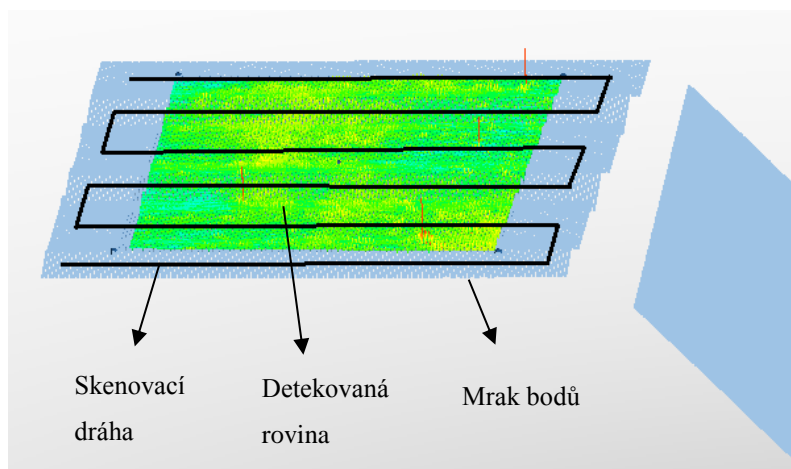
Měření prizma skenováním

Již vybrané plochy na prizmatu (z dotykového měření) jsem měřil ze tří orientací scanneru. Pro rovinu 1 a rovinu 2 jsem zvolil základní polohu scanneru A0,B0, protože jsou přibližně rovnoběžné s granitovou deskou stolu. Roviny 3 a 4 jsou nakloněné o úhel 45°, tudíž i natočení scanneru bylo 45° dle orientace roviny. Takto zvolené natočení jsem volil proto, aby byl scanner orientován ve směru normálového vektoru každé roviny.



Obr. 4-11: Princip skenování prizma scannerem

Všechny čtyři roviny jsem měřil nastavením skenovací dráhy na konkrétní rovinu. Pro každou rovinu byla vytvořena jedna skenovací dráha, tudíž jsem získal samostatný mrak bodů pro každou rovinu. Z jednotlivých mraků jsem následně detekoval elementy rovin.



Obr. 4-12: Strategie měření roviny scannerem

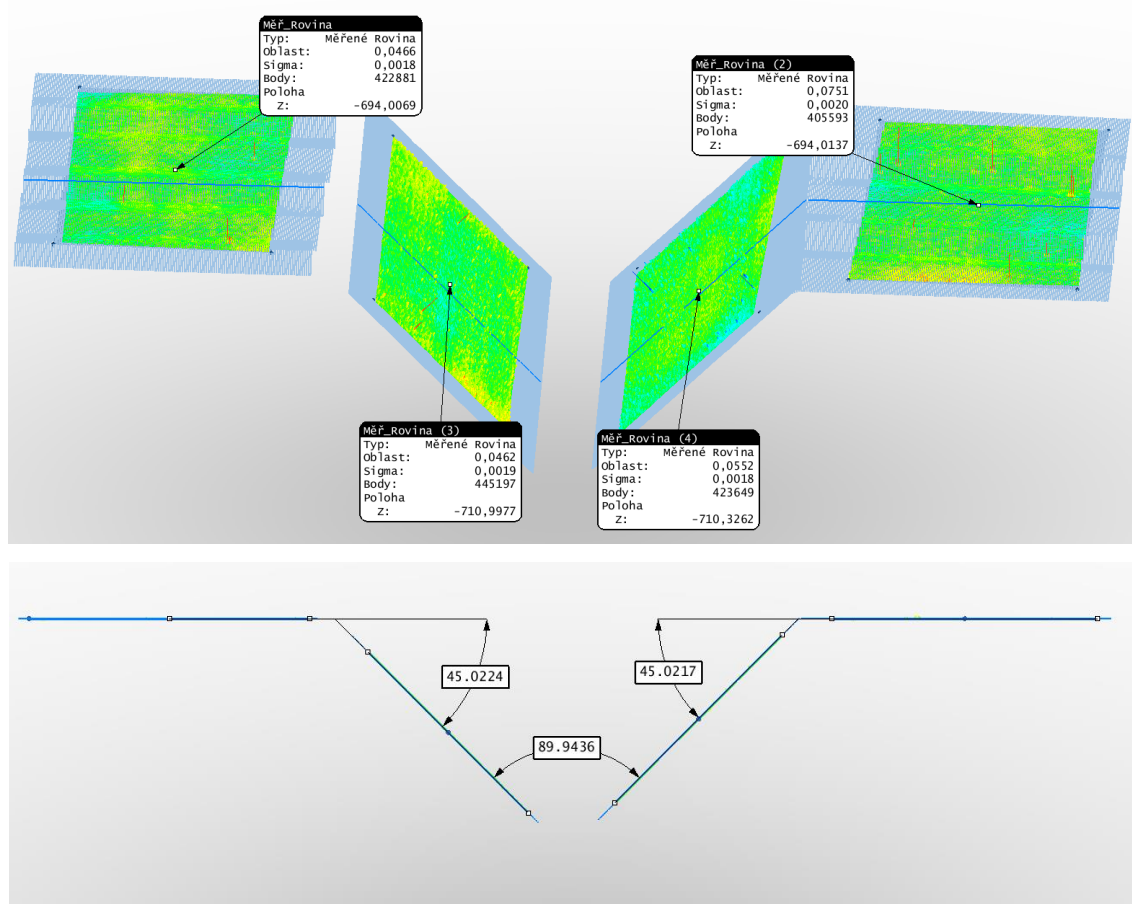
Detekci jsem neprovedl z celého mraku, abych neovlivnil výsledky nekorektně získanými body z přechodových hran rovin.

Postup měření:

Každá rovina byla změřena pětkrát při každé další vrstvě spreje. Tím jsem získal čtyři mraky bodů z jednoho měření a měření provedl v pěti opakování. Dohromady jsem naměřil dvacet mraků bodů pro každou vrstvu spreje.

Výsledky měření:

Ukážku protokolu uvádím na obrázku 4-13. Pro získání potřebných hodnot k určení tloušťky vrstvy prášku posloužil štítek z detekované roviny. Pro stanovení úhlu mezi rovinami 3 a 4 jsem použil řez mrakem bodů a detekci přímek z bodů, které reprezentují mrak bodů v tomto řezu. Hodnotu úhlu jsem vynesl právě mezi těmito přímkami. Jednotlivé mraky bodů obsahují přes 400 tisíc bodů pro každý mrak.



Obr. 4-13: Protokol z měření prizmatu scannerem – nahoře: poloha roviny v souřadném systému a tvar roviny, dole: úhel mezi rovinami

Měření ložiskové koule skenováním

Ložiskovou kouli jsem měřil v režimu laserového skenování z pěti natočení (orientací) indexovatelné hlavy. Skenoval jsem v pozicích natočení A0,B0; A90,B0; A90,B90; A90,B180 a A90,B-90. Pozice scanneru vůči měřené ložiskové kouli jsou znázorněny na obrázku 4-14. Zvolené pozice jsem vybral z důvodu naskenování vrchní části polokoule stejně jako při dotykovém skenování. Za spodní část polokoule je opět součást upevněna ke granitové desce souřadnicového stroje.



Obr. 4-14: Pozice laser scanneru vůči měřené kouli [16]

Pro každou pozici laser scanner zaznamená do měřicího software jeden sken. Dohromady jsem získal pět skenů pro jedno měření. Výsledná kulová plocha vznikla detekováním útvaru koule ze všech pěti skenů (celý mrak bodů) dohromady.

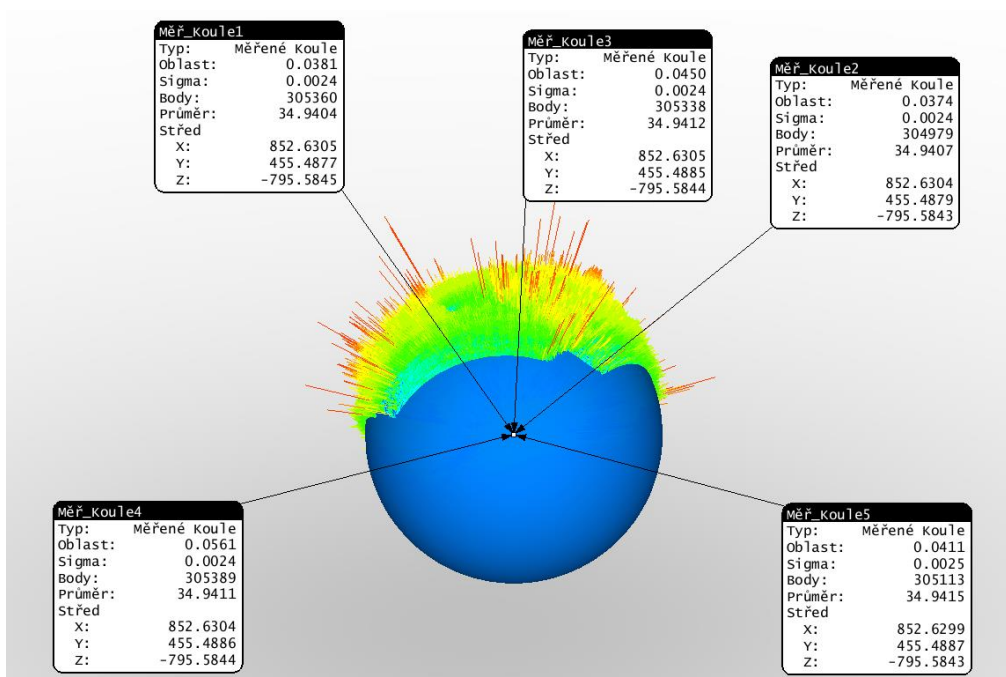
Postup měření:

Ze zadaných bodů této kapitoly vyplývá, že je potřeba změřit kouli opakovatelně s jednou vrstvou spreje a s více vrstvami spreje. Dle tohoto zadání jsem sestavil postup měření ložiskové koule takto:

- Měření koule s jednou vrstvou spreje – čtyři opakování pro stanovení opakovatelného nanesení prášku na element.
- Na již nanesenou vrstvu spreje nanést další vrstvu – stanovení hodnoty průměru koule s každou další vrstvou a zároveň stanovení nerovnoměrnosti nanesení spreje na element. Stanovení nárůstu chyby tvaru kulové plochy s každou další vrstvou spreje. Dohromady šest vrstev spreje na kouli.

Výsledky měření:

Na obrázku 4-15 uvádím ukázkou výstupního protokolu z měřicího sw Focus. Jako ukázkou jsem zvolil detekci koule z naměřeného mraku bodů pro měření koule bez spreje. Modrá kulová plocha znázorňuje detekovanou kouli z mraku bodů (detekci elementu z mraku bodů sw vyhodnocuje metodou nejmenších čtverců). Barevné body znázorňují naměřený mrak bodů s hodnotou odchylky od detekovaného útvaru. Výstupních štítků je pět, protože každé měření proběhlo v pěti opakováních.



Obr. 4-15: Protokol z měření ložiskové koule scannerem

Každý typ měření jsem provedl opakovaně v pěti náměrech (koule i prizma) a výsledné hodnoty zprůměroval dle vzorce aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [21]$$

Všechny protokoly prizma a ložiskové koule uvádím v příloženém CD u své práce, kde příkládám i programy z měření.

Výsledky stanovených bodů kapitoly

Všechny výpočty a grafická znázornění z naměřených hodnot jsem zpracoval v sw MS Office. Nejprve jsem provedl přehledné zapsání získaných hodnot do tabulek. Z tabulek jsem vybral hodnoty potřebné pro zadané body kapitoly, provedl statistické výpočty a vytvořil tabulky nové, ze kterých jsou vytvořené grafické závislosti. Pro názornou ukázkou jsem přidal i grafické závislosti hodnot směrodatných odchylek, na které lze také pozorovat ovlivnění vrstvou zmatňujícího spreje jak u prizmatu, tak u koule.

4.1 Tloušťka nanesené vrstvy prášku

První zadaný bod kapitoly je tloušťka nanesené vrstvy zmatňujícího prášku. Pro prizma jsem vytvořil tabulku s hodnotami polohy detekovaných rovin v ose z a pro kouli tabulku s hodnotami průměrů koulí pro každou vrstvu.

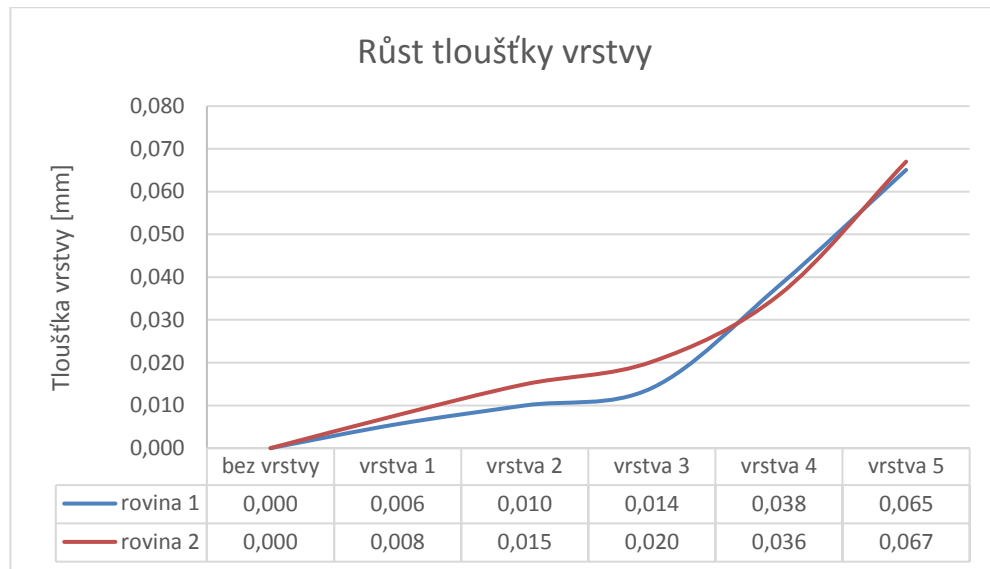
Prizma

Tabulka 4-1: Měřené hodnoty polohy rovin v ose z

Měřená data (osa z) [mm]		
	rovina 1	rovina 2
bez vrstvy	-694,013	-694,022
vrstva 1	-694,008	-694,014
vrstva 2	-694,003	-694,007
vrstva 3	-693,994	-693,994
vrstva 4	-693,965	-693,971
vrstva 5	-693,929	-693,927

Růst tloušťky vrstvy

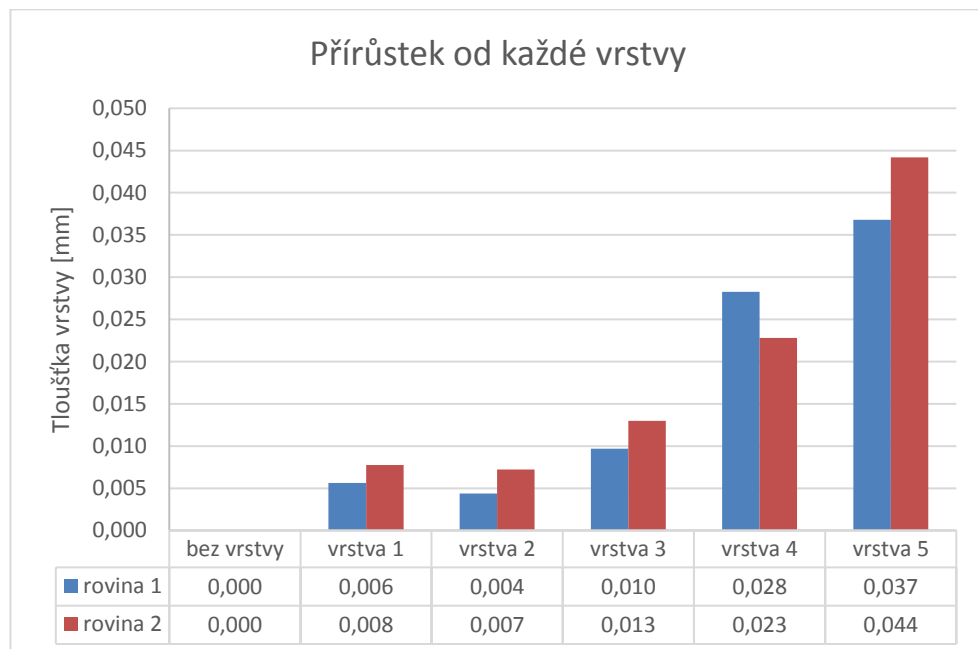
S každou další vrstvou se poloha detekované roviny zvětšovala. Obrázek 4-16 graficky znázorňuje velikost tloušťky prášku po každém nástřiku. První až třetí vrstva byla přibližně stejně veliká, ovšem od čtvrté vrstvy se tloušťka prášku podstatně zvětšila. Dle mého názoru je to způsobeno jednak vyšší přilnavostí prášku na prášek než prášku na kovovou součást a dále nekonstantním nanesením jednotlivých vrstev, čili hrubou chybou lidského faktoru.



Obr. 4-16: Grafické znázornění růstu tloušťky vrstvy na prizma

Přírůstek polohy od každé vrstvy jednotlivě

Přikládám i grafické znázornění tloušťky jednotlivých vrstev (Obr. 4-17). Z grafu lze vyčíst, že první tři vrstvy přidaly na rozměru součásti přibližně 4-8 μm pro každou nanesenou vrstvu. Čtvrtá a pátá vrstva přidaly více než 20 μm .



Obr. 4-17: Grafické znázornění přírůstku vrstvy

Koule

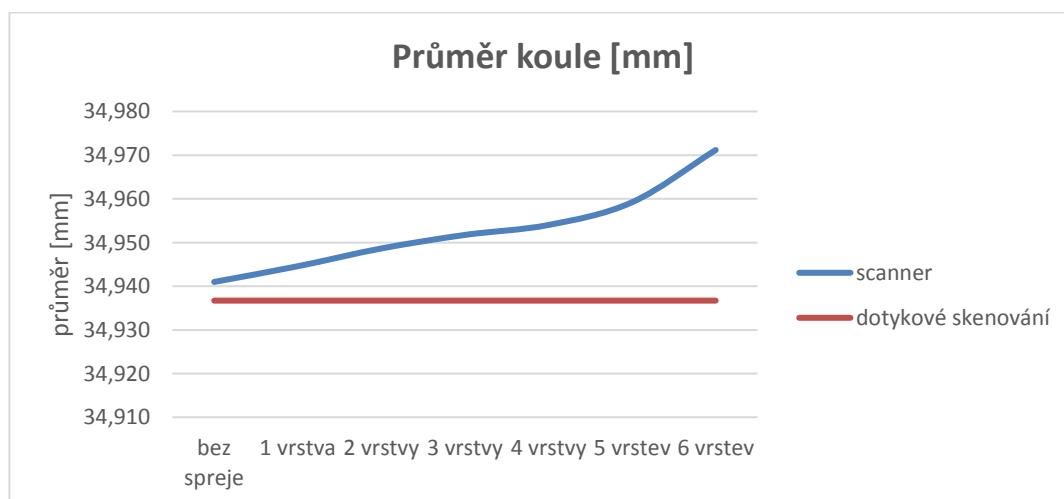
Tabulka 4-2: Měřené hodnoty průměru koule

	Průměr [mm]	
	scanner	dotykové skenování
bez spreje	34,941	34,937
1 vrstva	34,945	
2 vrstvy	34,949	
3 vrstvy	34,952	
4 vrstvy	34,954	
5 vrstev	34,959	
6 vrstev	34,971	

Růst průměru koule

Nominální průměr koule, zjištěný dotykovou skenovací metodou, je 34,937 mm a průměr koule stanovený detekcí z mraku bodů pořízeného scannerem je 34,941 mm. Rozdíl mezi těmito metodami měření vychází 4 μm .

Hodnotu průměru koule v závislosti na tloušťce vrstvy prášku znázorňuje obrázek 4-18. I při této metodě stanovení tloušťky vrstvy vychází přibližná hodnota pro jednu vrstvu 4 μm . Opět lze z grafu vyčíst, že první vrstvy jsou rovnoměrné a další vrstvy (při nanášení prášku na povrch již pokrytý větší vrstvou prášku) ovlivňují průměr koule více.

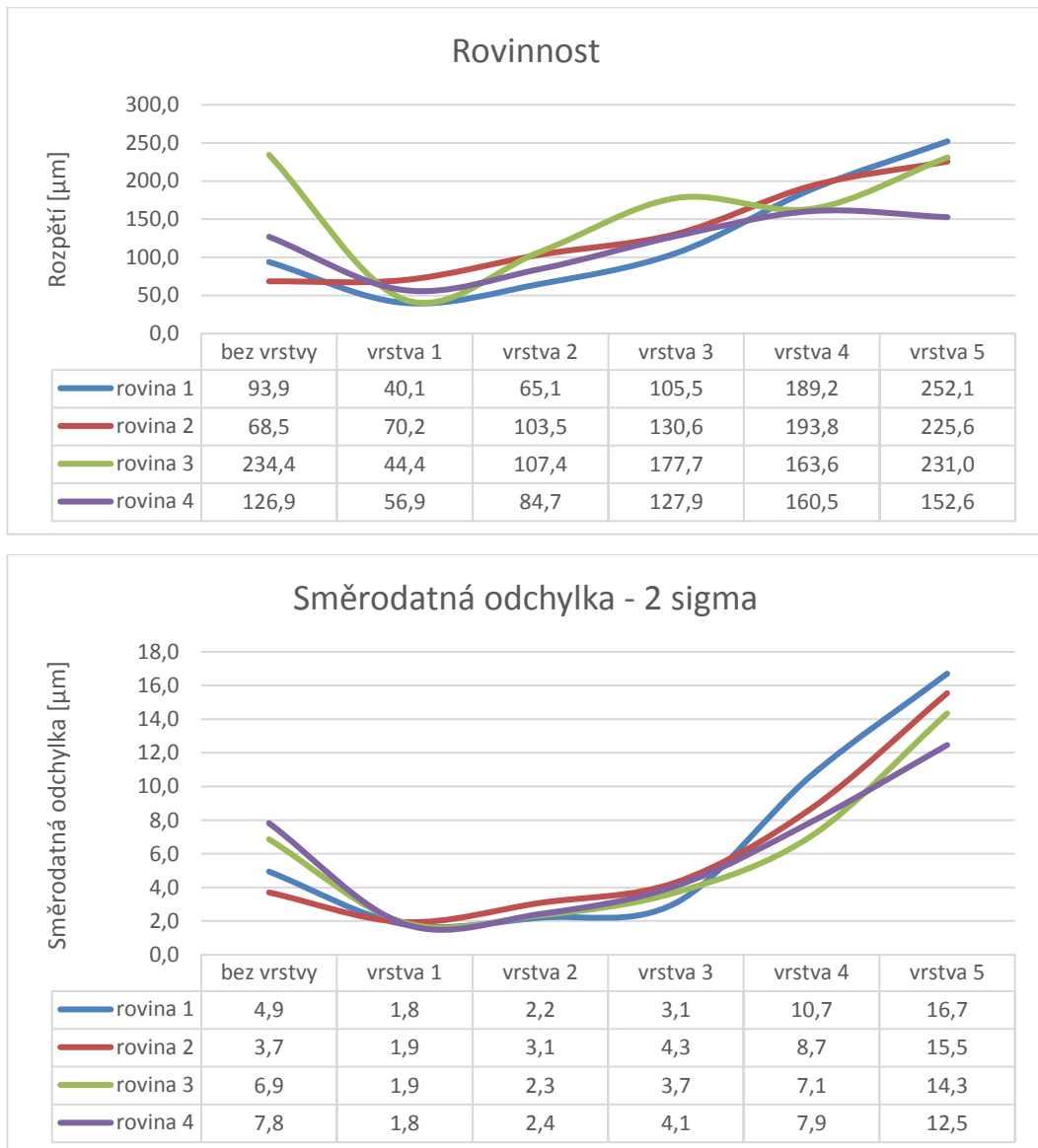


Obr. 4-18: Grafické znázornění růstu tloušťky vrstvy na kouli

4.2 Ovlivnění geometrických specifikací

Druhý stanovený bod by měl popsat vliv zmatňujícího spreje na geometrické charakteristiky. Z měřených hodnot jsem vybral takové hodnoty, které popisují geometrické specifikace součástí. Konkrétně hodnoty rovinností pro vybrané plochy na prizmatu a chybu tvaru kulové plochy pro ložiskovou kouli. Dále jsem určil změnu velikosti úhlu mezi vybranými rovinami na prizmatu.

Prizma



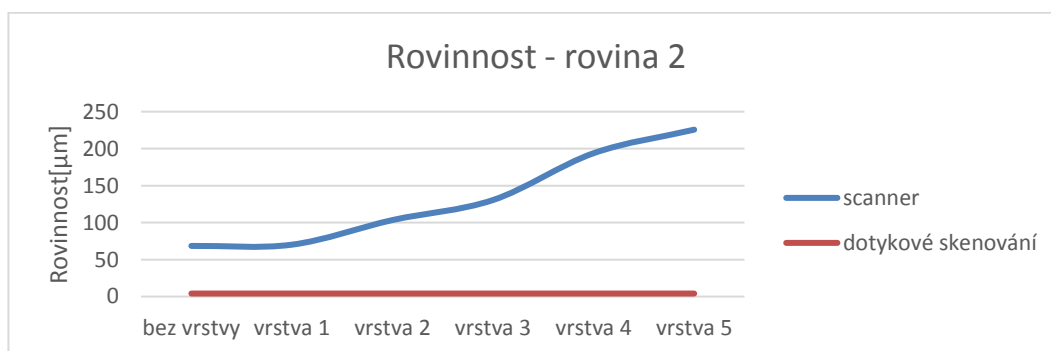
Obr. 4-19: Grafické znázornění změny hodnot rovinnosti důsledkem vrstev prášku

Poměrně vysoké hodnoty při měření rovin bez spreje jsou důsledkem odlesků a šumu. Jak popisují v teoretické části práce v kapitole o laser scannerech, důsledkem těchto negativních jevů je vznik odlehlých hodnot. A vzhledem k tomu, že data nebyla filtrována, je zřejmé ovlivnění výsledku odlehlými hodnotami. Lesklý povrch vykazuje více odlehlých hodnot, než povrch pokrytý vrstvou prášku.

Hodnoty rovinnosti jsem u roviny 2 porovnal s hodnotou získanou dotykovým skenováním. Porovnání je znázorněno na obrázku 4-20.

Tabulka 4-3: Měřené hodnoty rovinnosti pro rovinu 2

Rovinnost [μm] - rovina 2		
	scanner	dotykové skenování
bez vrstvy	68	4
vrstva 1	70	
vrstva 2	103	
vrstva 3	131	
vrstva 4	194	
vrstva 5	226	



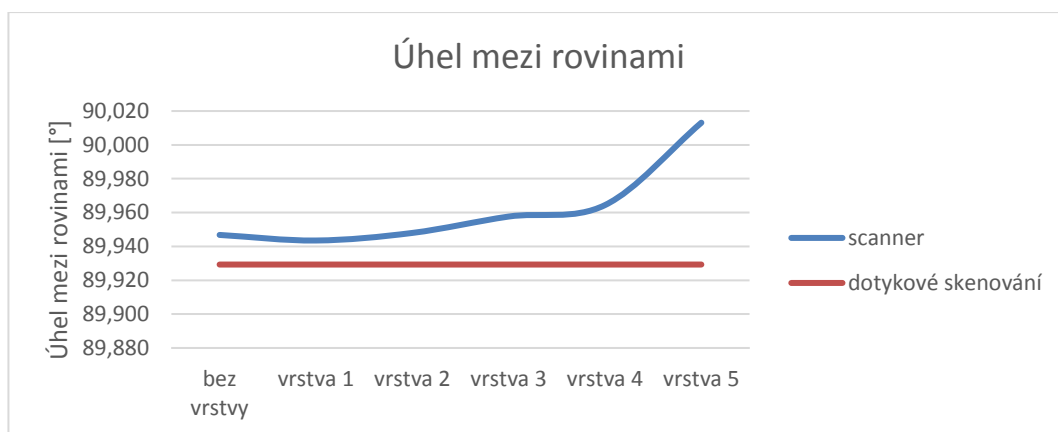
Obr. 4-20: Grafické znázornění změny rovinnosti s každou vrstvou – rovina 2

Závislost změny velikosti úhlu na vrstvách prášku

Úhel jsem stanovil mezi rovinami 3 a 4 na prizmatu. Z grafické závislosti na obrázku 4-21 lze pozorovat zvětšení úhlu s narůstající vrstvou prášku.

Tabulka 4-4: Měřené hodnoty velikosti úhlu

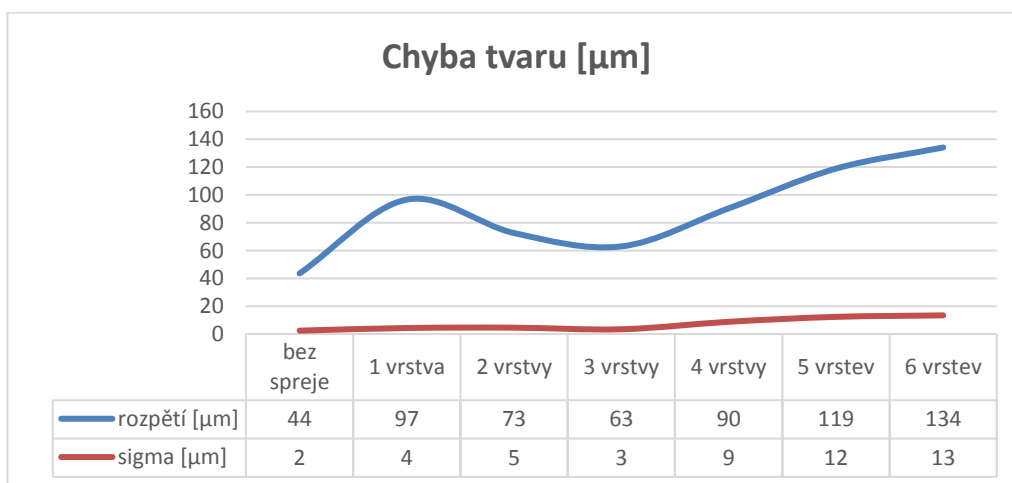
Úhel mezi rovinami [°]		
	scanner	dotykové skenování
bez vrstvy	89,947	89,929
vrstva 1	89,944	
vrstva 2	89,948	
vrstva 3	89,958	
vrstva 4	89,964	
vrstva 5	90,013	



Obr. 4-21: Grafická závislost změny úhlu v důsledku na vrstvách pášku

Koule

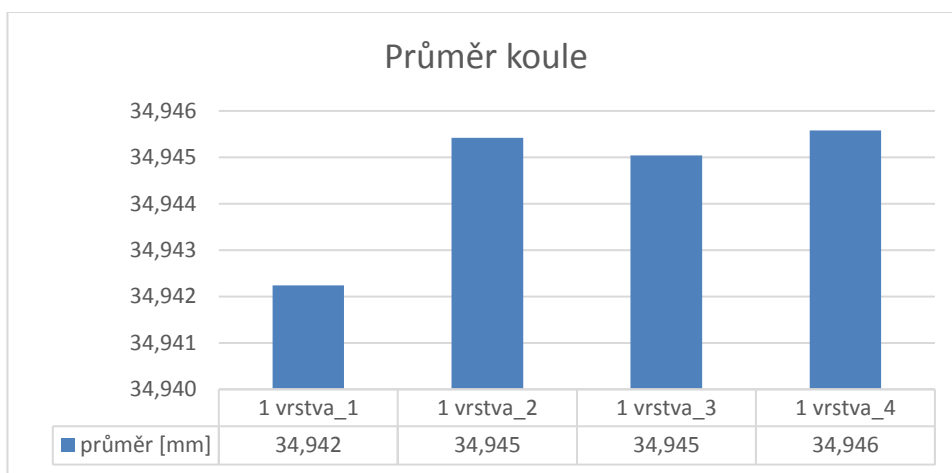
Obrázek 4-22 znázorňuje grafickou závislost chyby tvaru kulové plochy pro všechny změřené hodnoty.



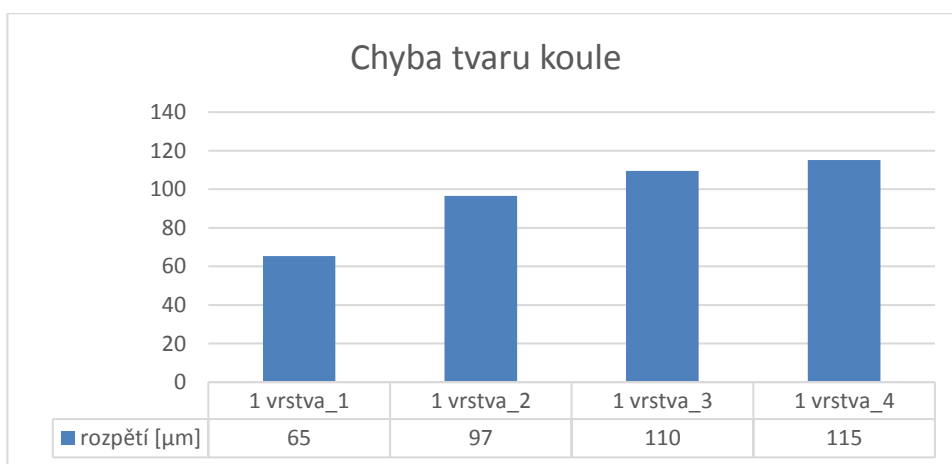
Obr. 4-22: Grafická závislost chyby tvaru kulové plochy

4.3 Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení

Pro stanovení posledního bodu jsem zvolil experiment na kouli. Měření jsem provedl tak, že jsem nanесl jednu vrstvu prášku na kouli a nasnímal mrak bodů. Následně jsem vrstvu z koule setřel, kouli důkladně očistil a nanесl znovu jednu vrstvu. Celkem jsem provedl čtyři opakování a výsledky vynesl do grafické závislosti, která je uvedena na obrázcích 4-23 a 4-24. Hodnoty průměru koule byly v rozmezí 34,942 mm až 34,946 mm. Opakovatelnost vrstev v závislosti na parametru průměru koule je 4 μm . Hodnota vychází nízká, což přisuzuji způsobu detekování elementu z mraku bodů. Rozpětí maximální a minimální hodnoty z mraku je 65 μm až 115 μm . Tyto hodnoty udávají opakovatelnost 50 μm .



Obr. 4-23: Grafické znázornění opakovaného nanесení jedné vrstvy prášku na kouli – hodnota průměru koule



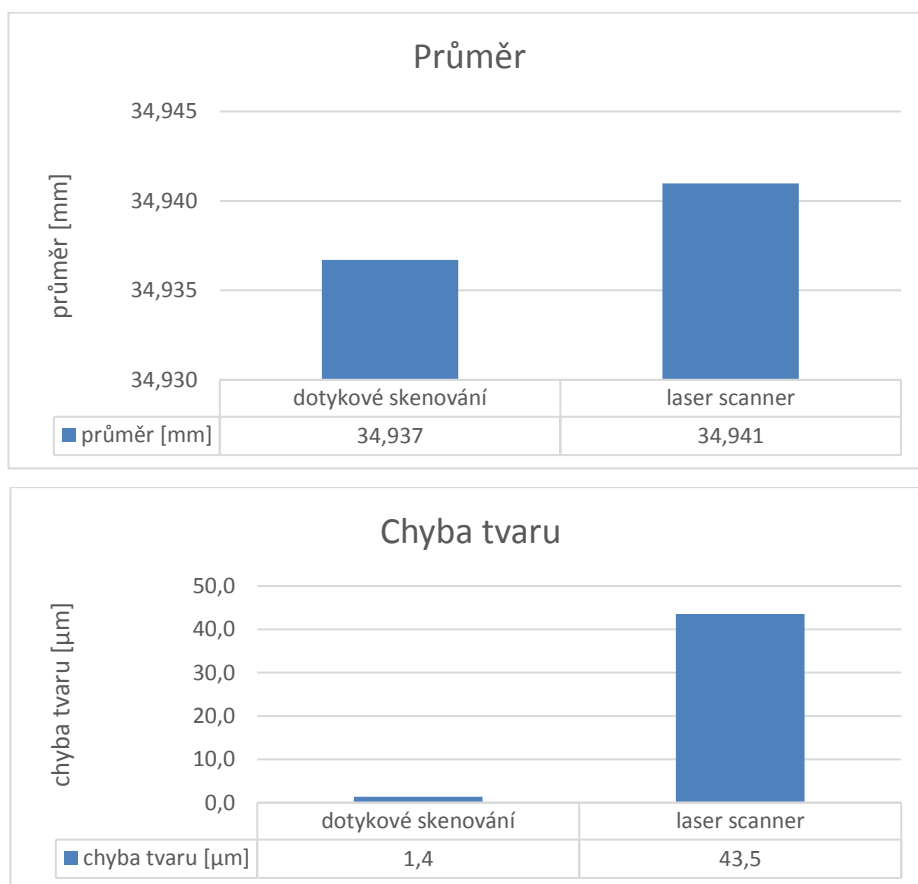
Obr. 4-24: Grafické znázornění opakovaného nanесení jedné vrstvy prášku na kouli – hodnota rozpětí maximální a minimální hodnoty z detekovaných bodů

4.4 Vliv měřicí metody a měřicího software na výsledky měření

Zde je nutné podotknout, že software pro zpracování mraků bodů byl primárně navržen pro porovnávání tvaru ploch. V oboru vyhodnocování geometrických úchylek tvaru nemůže skener nahradit zařízení, jako jsou kruhoměry nebo CMM s kontaktními skenovacími snímači, jejichž softwary obsahují fázové filtry dat a snímače pracují s řádově nižší nejistotou než laserové skenery [6]. U mraku bodů nelze použít frekvenční filtr. Bylo by potřeba použít 3D frekvenční filtr, který neexistuje.

4.4.1 Porovnání na ložiskové kouli

Z grafických závislostí na obrázku 4-25 je patrné, že hodnotu průměru detekovaného elementu lze metodou skenování určit řádově se stejnou přesností jako při dotykové metodě měření. Ovšem hodnotu geometrické úchytky nikoli. Důvodem je již zmíněné filtrování mraku bodů a náchylnost scannerů na odlehlé hodnoty.



Obr. 4-25: Porovnání dotykového a laserové skenování bodů na kouli

4.4.2 Multiwave element

Grafické závislosti v této kapitole popisují důsledek vrstvy prášku vlivem nerovnoměrného nanesení. Lze vidět, že každá vrstva podstatně změní minimální a maximální hodnotu detekovaného útvaru. Z těchto závislostí mohu konstatovat, že je velice důležité, jakou metodou jsou počítány elementy při detekci z mraku bodů. Společnosti vyvíjející sw pro práci s mrakem bodů mají vytvořené algoritmy pro tyto výpočty. Požádal jsem výrobce měřicího sw Focus o popis těchto algoritmů, ovšem z důvodu know-how společnosti jsem dostal odpověď, že detekce je založena na metodě nejmenších čtverců v závislosti na parametru dvou směrodatných odchylek (u měřených elementů jsem v této kapitole vypsál i směrodatnou odchylku). Algoritmus je odlišný pro detekci různých útvarů a jedná se o komplexní metody extrakce elementů z mraku bodů. Nelze tedy napsat, že jsou elementy detekovány pouze metodou nejmenších čtverců, ale během detekce nastane filtrace všech zvolených bodů dle konkrétního algoritmu. Dále je vhodné, aby byla data filtrována i uživatelem. V tomto případě ovšem nelze s určitostí stanovit, jaké body jsou považovány za odlehlé a může nastat i nekorektní ovlivnění měřených dat. Z tohoto důvodu jsem filtraci bodů vynechal a pro veškeré výstupy této kapitoly používám data nefiltrovaná.

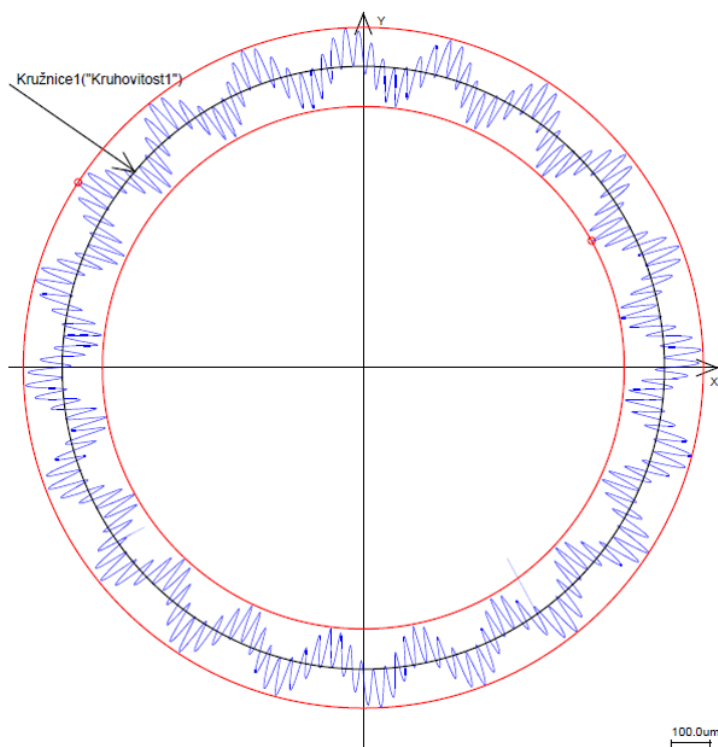
Abych se přesvědčil, že detekce elementů z mraku bodů odpovídá přibližně hodnotě výpočtu elementů metodou nejmenších čtverců, navrhl jsem ještě jeden experiment. Využil jsem speciální etalon (válcová plocha), na kterém je úmyslně zanesena chyba tvaru součásti. Etalon byl vyřezán na drátořezu a jeho povrch obsahuje dvě superponované frekvence.



Obr. 4-26: Etalon se superponovanými frekvencemi [39]

Nominální data etalonu

Nominální data byla opět naměřena souřadnicovým strojem Zeiss na fakultě strojní ČVUT metodou dotykového skenování.



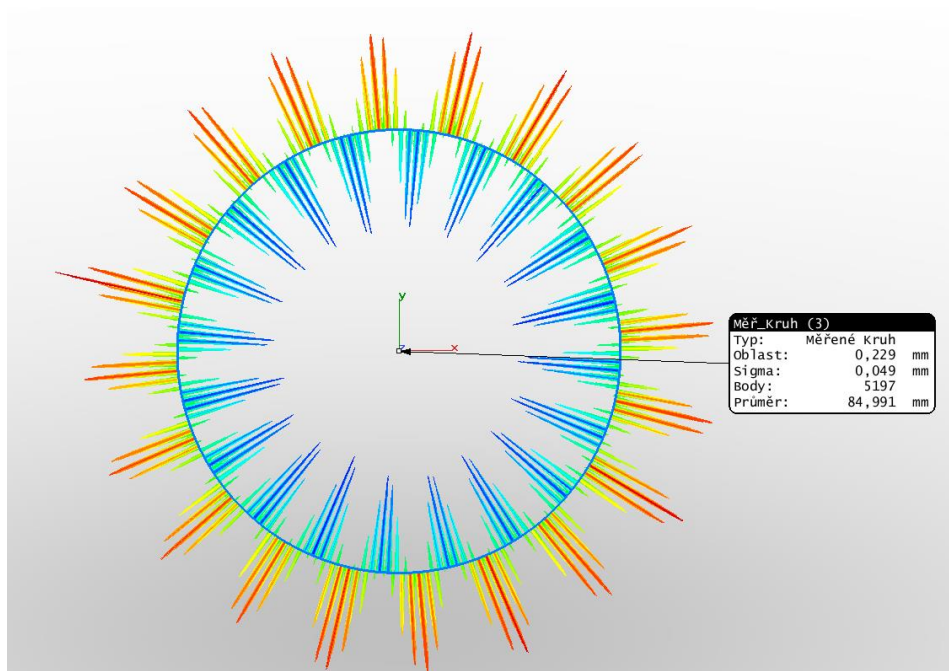
Obr. 4-27: Grafický protokol etalonu z měření dotykovou skenovací metodou [39]

Tabulka 4-5: Nominální hodnoty etalonu v závislosti na metodě výpočtu v milimetrech

[39]

Metoda výpočtu	Aktuální průměr	Nominální průměr	Horní tolerance	Dolní tolerance	Odchylka
LSC	84.9936	84.9	0.1	-0.1	0.0936
MIC	84.7907	84.9	0.1	-0.1	-0.1093
MCC	85.1861	84.9	0.1	-0.1	0.2861
MZC	84.9884	84.9	0.1	-0.1	0.0884

Tabulka 4-5 uvádí hodnoty průměru etalonu v závislosti na metodě výpočtu kružnice. Pro ověření výsledků ve své práci změřím etalon laser scannerem a následně nechám měřicí sw vypočítat hodnotu průměru etalonu. Dle hodnoty průměru etalonu si ověřím, jaké normované metodě se nejvíce blíží algoritmus výpočtu při detekci elementu z mraku bodů.



Obr. 4-28: Detekovaný element z mraku bodů

Metodou laserového skenování jsem získal hodnotu průměru 84,991 mm. Tato hodnota se nejvíce přibližuje hodnotě 84,9936 mm, kterou reprezentuje výpočet metodou nejmenších čtverců. Nominální hodnota kruhovitosti je stanovena 0,2 mm a rozsah maximální a minimální hodnoty detekované kružnice z mraku bodů vychází 0,229 mm.

Závěr kapitoly

Na základě experimentu s multiwave elementem mohu potvrdit, že vypočítané elementy v celém rozsahu mé práce odpovídají výpočtu metodou nejmenších čtverců a hodnoty geometrických specifikací odpovídají reálnému stavu povrchu. Velikosti rozsahů maximálních a minimálních hodnot přisuzují vlivu naneseného zmatňujícího spreje a vlivu odlehlých (nefiltrovaných) dat.

Závěr

Tato práce se věnovala snímacímu systému laser scanneru a jeho využití pro extrakci bodů ze součástí, které byly následně využity pro zpětnou tvorbu parametrického CAD modelu. V první části jsem rozdělil souřadnicové měřicí stroje do dvou kategorií dle souřadného systému. Uvedl jsem základní typy konstrukcí strojů, které pracují v kartézském souřadném systému a základní stroje pracující v nekartézském souřadném systému. U každého stroje jsem popsal princip snímání bodů a jeho využití v praxi a uvedl jsem tabulku s porovnáním nejběžněji používaných souřadnicových strojů. Dále jsem popsal rozdělení snímacích systémů pro souřadnicové stroje a hlavní pozornost jsem věnoval snímacímu systému laser scanneru. Na závěr kapitoly jsem uvedl porovnání metody kontaktního snímání bodů s bezkontaktním, které reprezentuje právě laser scanner.

Následně jsem popsal princip reverzního inženýrství, využití této technologie v různých odvětvích a postup tvorby parametrického modelu z reálné součásti, který je specifický pro využití reverzního inženýrství ve strojírenství.

Na druhou kapitolu této práce navazuje kapitola následující, ve které se věnuji popsanému teoretickému postupu reverzního inženýrství na konkrétní součásti, a to lopatce do turbíny. Pro sepsání této kapitoly mě inspirovala reálná situace ze strojírenské praxe. Během kapitoly popisuji postupnou tvorbu parametrického modelu od extrakce mraku bodů ze součásti až do výsledné tvorby modelu. Na závěr kapitoly uvádím porovnání vytvořeného modelu s původní polygonovou sítí, kterou jsem vytvořil z mraku bodů.

Vlivem lesklého povrchu lopatky jsem musel celý povrch součásti opatřit nástříkovým zmatňujícím práškem. Protože jsem nemohl určit vliv prášku na rozměry a geometrické charakteristiky součásti, navrhl jsem experiment, ve kterém popisuji vliv prášku na výslednou přesnost měření.

Závěrem mé práce je parametrický model lopatky a výsledky navrženého experimentu popisující vliv zmatňujícího spreje. Naměřená data pro experiment uvádím v příloze této práce. Veškeré programy z počítačových softwarů a soubory s výpočty a výstupy uvedené v celé práci přikládám na CD u mé práce.

Literatura

- [1] FLACK, David. 2014. *Measurement Good Practice Guide No. 43, CMM probing*, ISSN 1368-6550 [online] Dostupné z <http://www.npl.co.uk/publications/guides/cmm-probing>.
- [2] PALÁSEK, V. 2009. *Souřadnicové měřicí stroje (CMM) s optickým snímacím systémem a optické CMM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [3] TICHÁ, Šárka. 2006. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita.
- [4] BOSCH, John A. 1995. *Coordinate measuring machines and systems*. New York: M. Dekker. ISBN 08-247-9581-4.
- [5] DVOŘÁK, Rudolf. 1992. *Strojírenská metrologie*. Praha: České vysoké učení technické.
- [6] MACHÁČEK, Pavel. 2014. *Návrh metodiky měření geometrických specifikací výrobků pomocí prostorového skenování*. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf DVOŘÁK, CSc.
- [7] CHRISTOPH, Ralf, NEUMANN, Hans Joachim. 2008. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. [s.l.] : [s.n.], 108 s.
- [8] WRIGHT, Ian. 2016. *3 Tips for Choosing the Best Coordinate Measuring Machine for Your Quality Process* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/BIM/ArticleID/11460/3-Tips-for-Choosing-the-Best-Coordinate-Measuring-Machine-for-Your-Quality-Process.aspx>
- [9] *Coordinate Measuring Machines Horizontal Arm Configuration* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: <http://www.coord3-cmm.com/cmm-cmm/coordinate-measuring-machines-horizontal-arm-configuration/>
- [10] *LK V-R Rail-mounted bridge CMM* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/Bridge-CMM/Rail-Mounted-Bridge-CMM
- [11] *ALTERA CMM Series* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/Bridge-CMM/ALTERA-ceramic-bridge-CMM
- [12] *Nikon metrology MCAx: service manual* [YDM0066-A1].
- [13] PROKOP, Martin. 2013. *Co je laser tracker a jak se s ním měří?*. TOPMES S.R.O.

- [14] *Laser tracker API Radian* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: <http://www.apisensor.com/products/radian/>
- [15] *Souřadné systémy* [online]. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: http://www.gymrumburk.cz/personal/lib/exe/fetch.php?media=seifert:ujep:fpi:p02-souradnice_atp.pdf
- [16] *LC15Dx laser scanner* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Laser-Scanning/CMM-scanning/LC15Dx-laser-scanner
- [17] *Pětiosé systémy Renishaw* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/petiose-systemy--13413>
- [18] OPAT, Jan. 2015. *Vybrané metody měření tvaru a deformace ploch a jejich rekonstrukce*. Praha. Diplomová práce. ČVUT.
- [19] PAVELKA, Karel. 2006. *Fotogrammetrie 20*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN: 80-01-02762-7.
- [20] *ZEISS PRISMO navigator* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html
- [21] KOPTIŠ, Michal. 2013. *Využití přípravku MCG k ověřování přesnosti souřadnicových měřicích strojů*. Praha. Bakalářská práce.
- [22] WANG, Wego. 2011. *Reverse Engineering : Technology of Reinvention*. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [23] HOSCHEK, Josef a Werner DANKWORT. 1996. *Reverse Engineering*. Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-322-84819-2.
- [24] SOCHOR, J. 1996. *Údržba softwaru*. Zpravodaj ÚVT MU. ISSN 1212-0901. Dostupné z: <http://webserver.ics.muni.cz/zpravodaj/articles/61.html>
- [25] *Corgi Tupolev Tu-4 Soviet Air* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: <http://www.daveswebshop.com/aa31804.shtml>
- [26] *Monogram 1/48 B-29 Superfortress Plastic Model Kit* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: <http://www.revell.com/model-kits/aircraft/85-5718>.
- [27] PAGÁČ, Marek. 2012. *Výhody 3D navrhování #2: K čemu je dobrá parametrizace a asociativita* [online]. [cit. 2016-06-24]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2012/02/10/vyhody-3d-navrhovani-2-k-cemu-je-dobra-parametrizace/>

- [28] LINKEOVÁ, Ivana. *Interpolační NURBS křivky* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: http://marian.fsik.cvut.cz/~linkeova/vyuka/pubic/novemesto2006_li.pdf
- [29] GROOVER, Mikell P. 2013. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, xv, 1101 s. ISBN 978-1-118-23146-3.
- [30] *Laser Radar MV331/351 - Automated, non-contact large scale metrology* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Large-Volume-Applications/Laser-Radar/MV330-MV350-Laser-Radar
- [31] *Vysvětlení interferometrie* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vysvetleni-interferometrie--7854>
- [32] KRÁLOVÁ, Ilona. 2005. *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.2>
- [33] *Focus Scan 10.X: Uživatelský manuál*. 2013. Topmes, s.r.o. Praha.
- [34] COSTA, Manuel. 1996. *Use of CCD arrays versus PSD detectors in an optical triangulation-based microtopographer* [online]. [cit. 2016-07-08]. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1020088>
- [35] *Prüf-Spray-Naßentwickler Weiß Helling U-89* [online]. [cit. 2016-07-08]. Dostupné z: http://profi-schweiss-shop.de/product_info.php?info=p986_Pruef-Spray-Na-entwickler-Wei--Helling-U-89.html
- [36] *XC65Dx laser scanner* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Laser-Scanning/CMM-scanning/XC65Dx-laser-scanner
- [37] WEIXING, Cai. 2008. *Preliminary study of a phase-contrast cone-beam computed tomography system: the edge-enhancement effect in the tomographic reconstruction of in-line holographic images* [online]. [cit. 2016-07-09]. DOI: 10.1117/1.2897284. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1088790>
- [38] NENÁHLO, Čeněk. 2011. *Souřadnicová měřicí technika*. Článek v časopise MMSpektrum. DOI: 110316.
- [39] BERÁNEK, Libor. 2016. *ROUNDNESS MEASUREMENT*.

Seznam obrázků

Obr. 1-1: Základní rozdělení CMM	14
Obr. 1-2: Kartézský souřadný systém [15]	15
Obr. 1-3: Stojanový typ CMM – Zeiss PRO Horizontal Arm [8].....	15
Obr. 1-4: Výložníkový typ CMM – Coord 3 Swan runway model [9].....	16
Obr. 1-5: Portálový typ CMM – LK V-R [10].....	17
Obr. 1-6: Mostový typ CMM – LK Altera [11]	17
Obr. 1-7: Sférický souřadný systém [15]	18
Obr. 1-8: Měřicí rameno Nikon metrology MCAx [12]	19
Obr. 1-9: Laser tracker API Radian,(zleva: kontrolér, laser tracker, SMR odražeč) [13]	20
Obr. 1-10: Laser radar Nikon MV330 [30].....	21
Obr. 1-11: Rozdělení snímacích systémů CMM.....	22
Obr. 1-12: Vlevo: Laser scanner nasazený na indexovatelné hlavě Renishaw [16], vpravo: zobrazení polohovacích os indexovatelné hlavy [17]	23
Obr. 1-13: Schéma spínacího snímacího systému [1].....	25
Obr. 1-14: Schéma tenzometrického snímacího systému [1].....	25
Obr. 1-15: Analogový skenovací systém Zeiss [1]	26
Obr. 1-16: Princip optické interferometrie [32]	27
Obr. 1-17: Triangulační trojúhelník pro 1D aktivní triangulaci[32]	29
Obr. 1-18: Fotogrammetrický digitální fotoaparát [2]	32
Obr. 1-19: Princip promítání pruhů na součást [2]	32
Obr. 1-20: Bezpečnostní štítek na laserovém scanneru LC60 [33].....	33
Obr. 1-21: Princip triangulačního senzoru – vlevo 2D triangulace, vpravo 1D triangulace [16, 32]	34
Obr. 1-22: Laserová linie scanneru [6]	35
Obr. 1-23: Přímý odraz paprsku do kamery [6]	38
Obr. 1-24: Zmatňující sprej [35]	38
Obr. 1-25: Laserová linie na matném a bílém povrchu.....	39
Obr. 1-26: Scanner Nikon LC15Dx na stacionární CMM [33]	41
Obr. 1-27: Scanner Nikon MMDx 100 na mobilní měřicí ramena [12]	42

Obr. 1-28: Cross scanner Nikon XC65Dx [36].....	43
Obr. 1-29: Princip počítačové tomografie [37]	44
Obr. 2-1: Podobnost Tu-4 (vlevo) a B-29 (vpravo) [25, 26].....	46
Obr. 2-2: Skenovaný prototyp Igráčka.....	48
Obr. 2-3: Postup reverzního inženýrství	49
Obr. 3-1: Tvar reálné součásti – lopatka do turbíny	53
Obr. 3-2: Pořízené skeny lopatky ze dvou upevnění	55
Obr. 3-3: Spojené mraky bodů metodou best-fit.....	55
Obr. 3-4: Rastrový filtr mraku bodů	56
Obr. 3-5: Křivkový filtr mraku bodů	57
Obr. 3-6: Polygonová síť.....	58
Obr. 3-7: Detail polygonové sítě s naznačenými polygony	58
Obr. 3-8: Destrukce sítě po importu do softwaru pro 3D tisk.....	59
Obr. 3-9: Neuzavřená polygonová síť následkem přenosu sítě mezi softwary.....	60
Obr. 3-10: Uzavření obálky polygonové sítě	60
Obr. 3-11: Detekování útvarů v sw Polyworks.....	61
Obr. 3-12: Ukázka funkce pro zvětšení a zmenšení detekovaných elementů.....	61
Obr. 3-13: Konstrukce řezů na polygonové síti	62
Obr. 3-14: Konstrukce křivek na polygonové síti.....	63
Obr. 3-15: Vytvoření NURBS ploch z hraničních křivek.....	63
Obr. 3-16: Chybně napojené NURBS plochy	64
Obr. 3-17: Parametrický model v drátovém zobrazení	64
Obr. 3-18: Úprava parametrického modelu v sw Autodesk Inventor	65
Obr. 3-19: Napojený parametrický model (kompozitní).....	65
Obr. 3-20: Barevná mapa odchylek parametrického modelu od polygonové sítě	66
Obr. 4-1: Měřená součást 1 - prizma.....	68
Obr. 4-2: Měřená součást – ložisková koule.....	68
Obr. 4-3: Nanesení spreje na součásti: vlevo prizma, vpravo koule.....	69
Obr. 4-4: Zeiss Prismo a analogová skenovací hlava VAST [20]	70
Obr. 4-5: Vybrané roviny na prizmatu.....	71
Obr. 4-6: Strategie měření roviny dotykově	71
Obr. 4-7: Protokol z měření prizmatu dotykově	72

Obr. 4-8: Strategie měření ložiskové koule dotykově.....	72
Obr. 4-9: Protokol z měření ložiskové koule dotykově	73
Obr. 4-10: Vlevo: Nikon metrology Altera [11], vpravo: chyba snímače LC15Dx udávaná výrobcem [16]	74
Obr. 4-11: Princip skenování prizma scannerem	75
Obr. 4-12: Strategie měření roviny scannerem	75
Obr. 4-13: Protokol z měření prizmatu scannerem – nahoře: poloha roviny v souřadném systému a tvar roviny, dole: úhel mezi rovinami	76
Obr. 4-14: Pozice laser scanneru vůči měřené kouli [16]	77
Obr. 4-15: Protokol z měření ložiskové koule scannerem	78
Obr. 4-16: Grafické znázornění růstu tloušťky vrstvy na prizma	80
Obr. 4-17: Grafické znázornění přírůstku vrstvy	80
Obr. 4-18: Grafické znázornění růstu tloušťky vrstvy na kouli	81
Obr. 4-19: Grafické znázornění změny hodnot rovinnosti důsledkem vrstev prášku.....	82
Obr. 4-20: Grafické znázornění změny rovinnosti s každou vrstvou – rovina 2	83
Obr. 4-21: Grafická závislost změny úhlu v důsledku na vrstvách prášku	84
Obr. 4-22: Grafická závislost chyby tvaru kulové plochy	84
Obr. 4-23: Grafické znázornění opakovaného nanesení jedné vrstvy prášku na kouli – hodnota průměru koule	85
Obr. 4-24: Grafické znázornění opakovaného nanesení jedné vrstvy prášku na kouli – hodnota rozpětí maximální a minimální hodnoty z detekovaných bodů	85
Obr. 4-25: Porovnání dotykového a laserové skenování bodů na kouli	86
Obr. 4-26: Etalon se superponovanými frekvencemi [39]	87
Obr. 4-27: Grafický protokol etalonu z měření dotykovou skenovací metodou [39].....	88
Obr. 4-28: Detekovaný element z mraku bodů	89

Seznam tabulek

Tabulka 1-1: Porovnání souřadnicových strojů [11, 12, 14, 16].....	21
Tabulka 1-2: Porovnání kontaktních metod měření s laser scannerem.....	45
Tabulka 4-1: Měřené hodnoty polohy rovin v ose z	79
Tabulka 4-2: Měřené hodnoty průměru koule	81
Tabulka 4-3: Měřené hodnoty rovinnosti pro rovinu 2.....	83
Tabulka 4-4: Měřené hodnoty velikosti úhlu	84
Tabulka 4-5: Nominální hodnoty etalonu v závislosti na metodě výpočtu v milimetrech	88

Seznam příloh

Příloha 1 – naměřené hodnoty kalibrační koule

Příloha 2 – naměřené hodnoty prizmatu

Přílohy

Příloha 1 – naměřené hodnoty kalibrační koule

KOULE - bez spreje			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	38,1	2,4	34,9404
2	45,0	2,4	34,9412
3	56,1	2,4	34,9411
4	41,1	2,5	34,9415
5	37,4	2,4	34,9407
aritmetický průměr	43,5	2,4	34,9410

KOULE - 1 vrstva - měření 1			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	64,4	2,9	34,9416
2	69,6	2,9	34,9422
3	56,0	3,0	34,9423
4	73,7	3,0	34,9426
5	62,8	2,9	34,9425
aritmetický průměr	65,3	2,9	34,9422

KOULE - 1 vrstva - měření 2			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	89,9	3,8	34,9454
2	96,9	3,8	34,9453
3	98,7	3,8	34,9453
4	100,4	3,8	34,9450
5	97,4	3,8	34,9461
aritmetický průměr	96,7	3,8	34,9454

KOULE - 1 vrstva - měření 3			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	118,8	5,9	34,9451
2	107,7	5,9	34,9455
3	105,8	5,8	34,9445
4	110,3	5,8	34,9452
5	105,3	5,8	34,9449
aritmetický průměr	109,6	5,8	34,9450

KOULE - 1 vrstva - měření 4			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	118,9	4,8	34,9461
2	116,5	4,7	34,9449
3	113,0	4,7	34,9460
4	117,2	4,7	34,9459
5	109,9	4,8	34,9450
aritmetický průměr	115,1	4,7	34,9456

KOULE - 2 vrstvy			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	61,8	4,3	34,9480
2	68,5	4,6	34,9489
3	76,0	4,8	34,9487
4	60,9	4,6	34,9487
5	95,7	4,5	34,9489
aritmetický průměr	72,6	4,6	34,9486

KOULE - 3 vrstvy			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	74,6	3,4	34,9514
2	72,1	3,4	34,9517
3	63,0	3,5	34,9519
4	47,5	3,4	34,9515
5	57,8	3,4	34,9522
aritmetický průměr	63,0	3,4	34,9517

KOULE - 4 vrstvy			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	98,0	8,8	34,9533
2	91,5	8,8	34,9543
3	92,2	8,8	34,9541
4	82,6	8,7	34,9546
5	87,4	8,8	34,9538
aritmetický průměr	90,3	8,8	34,9540

KOULE - 5 vrstev			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	119,0	12,4	34,9595
2	123,6	12,3	34,9592
3	114,3	12,4	34,9591
4	118,6	12,3	34,9590
5	119,1	12,3	34,9593
aritmetický průměr	118,9	12,3	34,9592

KOULE - 6 vrstev			
měření	chyba tvaru		průměr [mm]
	rozpětí [μm]	sigma [μm]	
1	133,8	13,3	34,9722
2	135,8	13,4	34,9707
3	134,4	13,5	34,9714
4	121,5	13,4	34,9706
5	145,1	13,4	34,9710
aritmetický průměr	134,1	13,4	34,9712

Příloha 2 – naměřené hodnoty prizmatu

PRIZMA - bez spreje - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	101,8	57,9	253,3	134,5
	sigma [μm]	4,8	3,7	6,9	7,8
poloha Z [mm]		-694,0139	-694,0226		
úhel [°]		89,9313			
PRIZMA - bez spreje - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	85,5	79,8	393,8	119,6
	sigma [μm]	4,9	3,7	6,9	7,8
poloha Z [mm]		-694,0137	-694,0226		
úhel [°]		89,9495			
PRIZMA - bez spreje - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	83,6	68,4	219,7	128,6
	sigma [μm]	5	3,7	6,9	7,8
poloha Z [mm]		-694,013	-694,0217		
úhel [°]		89,9551			
PRIZMA - bez spreje - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	96,4	67,7	134,9	129,4
	sigma [μm]	5	3,7	6,8	7,9
poloha Z [mm]		-694,013	-694,0217		
úhel [°]		89,9515			
PRIZMA - bez spreje - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	102,1	68,5	170,4	122,5
	sigma [μm]	5	3,7	6,8	7,8
poloha Z [mm]		-694,0129	-694,0217		
úhel [°]		89,9466			

PRIZMA - 1 vrstva - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	46,6	75,1	46,2	55,2
	sigma [μm]	1,8	2	1,9	1,9
poloha Z [mm]		-694,0069	-694,0137		
úhel [°]		89,9436			
PRIZMA - 1 vrstva - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	32,5	60,8	31,6	56,4
	sigma [μm]	1,8	1,9	1,9	1,8
poloha Z [mm]		-694,0076	-694,0142		
úhel [°]		89,9426			
PRIZMA - 1 vrstva - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	42,3	74	47,2	48,7
	sigma [μm]	1,8	2	1,9	1,8
poloha Z [mm]		-694,0077	-694,0144		
úhel [°]		89,9442			
PRIZMA - 1 vrstva - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	37,9	82,5	49,6	54,4
	sigma [μm]	1,8	1,9	1,9	1,8
poloha Z [mm]		-694,0081	-694,0146		
úhel [°]		89,9429			
PRIZMA - 1 vrstva - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	41,4	58,4	47,5	69,6
	sigma [μm]	1,8	1,9	1,9	1,8
poloha Z [mm]		-694,0081	-694,0147		
úhel [°]		89,9442			

PRIZMA - 2 vrstvy - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	115	223,5	171,7	63
	sigma [μm]	2,2	3,1	2,4	2,5
poloha Z [mm]		-694,003	-694,0069		
úhel [°]		89,9488			
PRIZMA - 2 vrstvy - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	54,7	60,9	51,9	56,7
	sigma [μm]	2,2	3,1	2,3	2,4
poloha Z [mm]		-694,0032	-694,0071		
úhel [°]		89,9481			
PRIZMA - 2 vrstvy - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	61,1	66,8	63,5	97,7
	sigma [μm]	2,2	3,1	2,3	2,4
poloha Z [mm]		-694,0035	-694,0072		
úhel [°]		89,9473			
PRIZMA - 2 vrstvy - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	49,9	97,5	88,4	119,4
	sigma [μm]	2,2	3	2,3	2,4
poloha Z [mm]		-694,0036	-694,0073		
úhel [°]		89,9472			
PRIZMA - 2 vrstvy - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	44,8	68,6	161,7	86,8
	sigma [μm]	2,2	3,1	2,4	2,4
poloha Z [mm]		-694,0033	-694,0071		
úhel [°]		89,9485			

PRIZMA - 3 vrstvy - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	176	167,6	202,5	90,5
	sigma [μm]	3,1	4,3	3,7	4,1
poloha Z [mm]		-693,9929	-693,9935		
úhel [°]		89,9577			
PRIZMA - 3 vrstvy - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	65,9	144,5	186,8	158,9
	sigma [μm]	3	4,3	3,7	4,1
poloha Z [mm]		-693,9935	-693,9938		
úhel [°]		89,9578			
PRIZMA - 3 vrstvy - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	126,5	110,7	187,3	142,1
	sigma [μm]	3,1	4,3	3,7	4,1
poloha Z [mm]		-693,9937	-693,9942		
úhel [°]		89,9577			
PRIZMA - 3 vrstvy - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	78,4	143,3	164,7	125,4
	sigma [μm]	3,1	4,3	3,7	4
poloha Z [mm]		-693,9939	-693,9944		
úhel [°]		89,9569			
PRIZMA - 3 vrstvy - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	80,5	86,7	147,4	122,5
	sigma [μm]	3,1	4,3	3,7	4,1
poloha Z [mm]		-693,9941	-693,9947		
úhel [°]		89,9582			

PRIZMA - 4 vrstvy - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	212,6	216	103,1	158,6
	sigma [μm]	10,7	8,7	7	7,9
poloha Z [mm]		-693,965	-693,9712		
úhel [°]		89,9649			
PRIZMA - 4 vrstvy - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	223,9	147,2	192,3	167,7
	sigma [μm]	10,7	8,7	7,1	7,9
poloha Z [mm]		-693,9652	-693,971		
úhel [°]		89,9647			
PRIZMA - 4 vrstvy - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	224,9	147,3	189	159,4
	sigma [μm]	10,7	8,7	7,1	7,9
poloha Z [mm]		-693,9657	-693,9715		
úhel [°]		89,9645			
PRIZMA - 4 vrstvy - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	120,5	222,2	151,2	174,2
	sigma [μm]	10,6	8,7	7,1	7,9
poloha Z [mm]		-693,9655	-693,9715		
úhel [°]		89,9637			
PRIZMA - 4 vrstvy - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	164	236,5	182,4	142,8
	sigma [μm]	10,6	8,7	7	7,9
poloha Z [mm]		-693,9653	-693,9713		
úhel [°]		89,9644			

PRIZMA - 5 vrstev - měření 1					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	266,5	263,7	189,3	157,9
	sigma [μm]	16,7	15,5	14,3	12,4
poloha Z [mm]		-693,9283	-693,9269		
úhel [°]		90,0112			
PRIZMA - 5 vrstev - měření 2					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	219,6	217,9	256,5	152,6
	sigma [μm]	16,7	15,6	14,4	12,5
poloha Z [mm]		-693,9284	-693,9269		
úhel [°]		90,0127			
PRIZMA - 5 vrstev - měření 3					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	285,1	224,6	231,8	153,4
	sigma [μm]	16,7	15,5	14,3	12,4
poloha Z [mm]		-693,9287	-693,9272		
úhel [°]		90,0138			
PRIZMA - 5 vrstev - měření 4					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	267,9	238,2	225,9	155,2
	sigma [μm]	16,7	15,5	14,3	12,5
poloha Z [mm]		-693,9286	-693,9272		
úhel [°]		90,0156			
PRIZMA - 5 vrstev - měření 5					
		rovina			
		1	2	3	4
rovinnost	rozpětí [μm]	221,5	183,8	251,5	143,8
	sigma [μm]	16,7	15,6	14,4	12,5
poloha Z [mm]		-693,9287	-693,9273		
úhel [°]		90,0122			