



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MINIMALIZACE CHYB PŘI VYROVNÁNÍ CAD MODELU NA SOUŘADNICOVÉM MĚŘICÍM STROJI (CMM)

MINIMIZING ERRORS IN THE ALIGNMENT OF THE CAD MODEL TO THE COORDINATE
MEASURING MACHINE (CMM)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Miko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Jan Miko
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Jan Šrámek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Minimalizace chyb při vyrovnání CAD modelu na souřadnicovém měřicím stroji (CMM)

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití různých metod pro vyrovnání nominálních dat na CAD modelech (pro měření délky na CMM), za použití různých snímacích dotyků CMM (dotyková sonda/scan), vyžaduje použití vhodné strategie na CAD model měřené součásti, která by minimalizovala vznik nežádoucích chyb při měření v praxi.

Cíle bakalářské práce:

Analýza současného stavu při využívání metod pro vyrovnání nominálních dat na CAD mode při měření na CMM.

Prezentace nejčastějších vad vzniklých při vyrovnání měření na CAD model.

Popis problematiky měření CMM, stanovení nejistoty měření, určení počtu stupňů volnosti při měření, zajištění metrologické návaznosti měření a podpory při měření dle CAD modelu.

Prezentace praktické ukázky měření na modelu CAD; vyhodnocení a popis vhodných postupů a doporučení vhodného nastavení strategie měření.

Vyhodnocení dosažených výsledků.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV Statistika a pravděpodobnost. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.

ČSN EN ISO 10360-2:2002. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů (ISO 10360-2:2001). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 35 s. Třídící znak 252011.

EA 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2)). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.

TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s.
Třídící znak 83031.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku vyrovnání naměřených dat na nominální data v oblasti metrologie – měření a vyhodnocení délkových rozměrů, úhlů a tolerancí polohy a tvaru. Začátek práce se zabývá rozdělením jednotlivých typů souřadnicových měřicích strojů a různých technologií snímání dat. V další části je popsán průběh měření, a především jakými způsoby lze měření provádět. V analýze využívání metod pro vyrovnání nominálních dat na CAD modelu při měření na CMM jsou rozřazeny a popsány jednotlivé metody vyrovnání. Nejčastějším vadám vzniklých při vyrovnání na CAD model se věnuje celá kapitola, ve které je popsáno, čím jsou jednotlivé vady ve většině případů způsobeny. Hlavní částí bakalářské práce je studie měření. V této studii je zpracováno vyhodnocení výstupů, které byly získány po provedení měření a vyrovnání naměřených dat na CAD model referenčního dílu. Vyrovnání je provedeno čtyřmi různými metodami. Následně došlo k porovnání jednotlivých metod a rozboru chyb, které během vyrovnání vznikly. V poslední části práce je provedeno statistické vyhodnocení měření a stanovení nejistoty měření na základě naměřených odchylek pozic posuzovaných geometrických prvků, které se vyskytovaly na referenčním dílu. V závěru práce jsou zhodnoceny jednotlivé výstupy, které byly získány během vypracování jednotlivých cílů bakalářské práce a doporučené způsoby vyrovnání pro konkrétní aplikaci.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the issue of alignment of measured data to nominal data in the field of metrology - measurement and evaluation of longitudinal dimensions, angles and tolerances of position and shape. The beginning of the work deals with the division of individual types of coordinate measuring machines and various data scanning technologies. The next section describes the measurement process, and especially in what ways the measurement can be performed. In the analysis of the use of methods for the alignment of nominal data on a CAD model when measuring on a CMM, the individual methods of alignment are classified and described. The most common defects caused by alignment to a CAD model are covered in the entire chapter, which describes what causes individual defects in most cases. The main part of the bachelor thesis is the study of measurements. In this study, the evaluation of outputs that were obtained after measuring and balancing the measured data on the CAD model of the reference part is processed. The alignment is performed by four different methods. Subsequently, the individual methods were compared and the errors that occurred during the alignment were analyzed. In the last part of the work, a statistical evaluation of the measurement and determination of the measurement uncertainty is performed on the basis of the measured deviations of the positions of the assessed geometric elements, which occurred on the reference part. At the end of the thesis, the individual outputs that were obtained during the elaboration of the individual goals of the bachelor's thesis and the recommended methods of alignment for a specific application are evaluated.

KLÍČOVÁ SLOVA

CMM, metoda vyrovnání, měřicí rameno, Best-fit, nejistota měření, vyrovnání měřených dat na CAD model

KEYWORDS

CMM, alignment method, measuring arm, Best-fit, measurement uncertainty, Alignment of measured data to CAD model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKO, Jan. *Minimalizace chyb při vyrovnání CAD modelu na souřadnicovém měřicím stroji (CMM)*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125589>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 51 s. Vedoucí práce Jan Šrámek.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Janu Šrámkovi, Ph.D. a rovněž Ing. Zdeňku Marečkovi za důležité rady a připomínky při vedení bakalářské práce. Také bych rád poděkoval rodině za veškerou podporu v celém průběhu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Šrámka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Jan Miko

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE	13
2.1	Stacionární CMM	13
2.1.1	Portálové souřadnicové měřicí stroje	13
2.1.2	Mostové souřadnicové měřicí stroje	15
2.1.3	Horizontální souřadnicové měřicí stroje	16
2.2	Mobilní provedení	17
2.2.1	Měřicí ramena	17
2.2.2	Laserové liniové skenery	19
2.2.3	Laser Tracker	19
3	PRŮBĚH MĚŘENÍ	21
3.1	Taktilní měření	21
3.1.1	Spínací dotykové senzory	22
3.1.2	Skenovací dotykové senzory	23
3.2	Laserové senzory	24
3.2.1	Optické senzory	24
4	ANALÝZA VYUŽÍVÁNÍ METOD PRO VYROVNÁNÍ NOMINÁLNÍCH DAT NA CAD MODELU PŘI MĚŘENÍ NA CMM	25
4.1	Vyrovnání pomocí informací o povrchu	25
4.2	Vyrovnání pomocí funkcí	26
4.2.1	Metoda vyrovnání pomocí tří rovin	26
4.2.2	Metoda vyrovnání pomocí roviny, vektoru a bodu	26
4.2.3	Metoda vyrovnání pomocí středových bodů	27
4.3	Metoda vyrovnání s referenčními cíli	27
5	NEJČASTĚJŠÍ VADY VZNIKLÉ PŘI VYROVNÁNÍ MĚŘENÍ NA CAD MODEL	28
5.1	Vady způsobené špatnou metodikou vyrovnání	28
5.2	Vady způsobené špatným výběrem prvků	29
6	STUDIE MĚŘENÍ	30
6.1	Vyrovnání metodou Best-fit	31
6.2	Vyrovnání metodou rovina-vektor-bod	33
6.3	Vyrovnání metodou tří rovin	35
6.4	Vyrovnání metodou středových bodů	37
6.5	Výsledné srovnání jednotlivých metod	39
6.6	Rozbor chyb	41
6.6.1	Metoda Best-fit	41
6.6.2	Metoda rovina-vektor-bod	41
6.6.3	Metoda tří rovin	41
6.6.4	Metoda středových bodů	41
7	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ	42
8	ZÁVĚR	47
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48

10 SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	49
10.1 Seznam zkratk a veličin	49
10.2 Seznam obrázků.....	50
10.3 Seznam tabulek	51

1 ÚVOD

Měřicí technika je jednou ze základních součástí průmyslových výrobních procesů, vývoje a výzkumu. Kontrola měřením je taktéž nedílnou součástí realizace výrobku, která přímo souvisí s požadovanou finální jakostí výrobků. Kontrola může probíhat například během výroby samotným dělníkem, který musí být vybaven adekvátními prostředky a znalostmi, pomocí kterých může kontrolovat jakost produkce, kterou vyrábí. Taková kontrola může probíhat jak po provedení výrobní operace, tak i v jejím průběhu. Na základě výsledků kontroly dělník výrobky třídí na shodné či neshodné. Avšak je nutné brát v potaz i čas, který dělník samokontrolou stráví. Podíl takto stráveného času k celkovému času výrobního procesu činí v závislosti na obtížnosti konkrétního procesu 10–20 %.

Druhou formou kontroly může být kontrola prováděna technickým kontrolorem z útvary řízení jakosti dané výroby, který musí být vybaven jak po stránce technické, tak personální a organizační. Jeho náplní je především prověření jakosti výrobku, analýza zjištěných nedostatků a návrh, resp. realizace nápravných opatření. Hlavním úkolem takové kontroly je předcházení vzniku neshodných výrobků.

Při kontrole může osoba provádějící kontrolu zvolit dva přístupy k měření. Jedním z přístupů je měření s CAD modelem. Takové měření má především výhody v tom, že kontrolující osoba díky CAD modelu disponuje informacemi o nominálních hodnotách a toleranci. Druhý přístup k měření je měření bez CAD modelu. Tento postup měření však není zcela ideální, protože s sebou nese výše zmíněné informace o výrobku, což způsobuje částečné omezení kontroly.

2 SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE

Souřadnicové měřicí stroje dělíme do dvou základních skupin – stacionární CMM a mobilní CMM.

Obecně stacionární CMM disponují vzhledem k typu konstrukce a jiným faktorům vyšší přesností než mobilní CMM. Pro porovnání-přesnost běžného stacionárního měřicího stroje je 0,001mm, načež mobilní CMM disponuje přesností 0,01mm a horší. Další výhodou stacionárního měřicího stroje je automatizační proces, ve kterém je možné naprogramovat stroj a ten může bez dalších zásahů operátora měřit i několik kusů. Takové pracoviště je možné vybavit robotem, který zakládá díly na měření, a druhý robot odebírá a třídí měřené kusy na základě výsledků měření. Tyto stroje se většinou umísťují do laboratoří nebo do míst, kde je stálá teplota a není zde prašnost.

Mobilní měřicí stroj většinou ovládá obsluha, což není zrovna efektivní. Na druhou stranu mobilní měřicí přístroje lze používat přímo ve výrobním prostředí (přímo u obráběcího stroje, v místě montáže, svařovny, atd.), kde je nestálá teplota, prašnost a jiné nepříznivé faktory negativně ovlivňující měření. Vhodné využití pro tyto přístroje je tam, kde je nutné měřit velký nebo těžký díl a přemístit jej do laboratoře ke stacionárnímu měřicímu přístroji by s sebou neslo složité a problematické řešení.

2.1 Stacionární CMM

2.1.1 Portálové souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí přístroje s pohyblivým portálem patří v současnosti mezi nejčastěji využívaný konstrukční princip velkých přístrojů. Díky integraci všech měřicích os do pohyblivého portálu zůstává dílec během měření v klidu, což je výhoda především při měření velkých a těžkých dílců. Takové přístroje jsou přednostně vybavené dotykovou sondou, ale je možné je dovybavit i laserovým skenerem nebo optickým snímačem. Malé portálové stroje mohou být v motorizovaném (pohyb stroje je zajištěn servomotorem) nebo manuálním provedení, kde je pohyb stroje zajišťován operátorem. [1] str. 61-63.

Popis stroje

Pevnou částí měřicího stroje je granitový stůl, který představuje pojezd pro vzduchová ložiska a vedení stroje v ose X. Měřené součásti mohou být upevněny přímo na povrchovou desku pomocí závitových otvorů vyvrtaných v granitové desce. Portál s vedením v ose X se skládá z příčného nosníku, pravé a levé nohy. Hlava se posouvá podél příčného nosníku mostu v ose Y. Pinola je spojena s hlavou a pohybuje se kolmo ke granitovému stolu. Pracovní pozice je umístěna na pravé přední straně stroje. Kompletní řešení stroje je shrnuto a uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Řešení portálového souřadnicového měřicího stroje

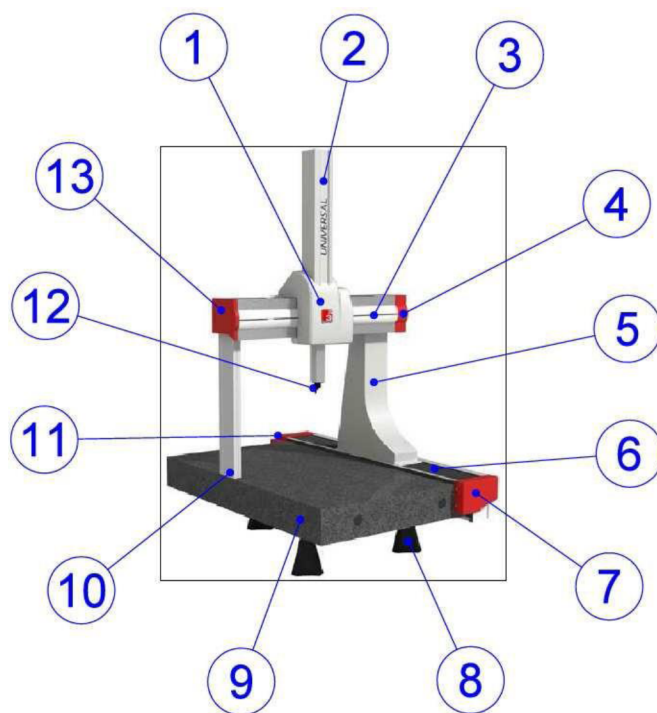
Ref.	Popis
KONSTRUKCE:	CNC souřadnicový měřicí stroj s kartézským souřadným systémem, pohyblivým portálem a granitovým základem
POVRCHOVÁ DESKA:	Jednolitá žulová povrchová deska s integrovaným vedením; isostatickými ložisky; rastru s otvory pro závit M8x1.25; rovinnost podle DIN 876 / III
POJEZDY STROJE:	Osa X: integrované vedení v žulovém základu; Osy Y / Z: mikroskopické vodící lišty na v extrudované eloxované slitině hliníku
ŘÍZENÍ:	Přímé řízení pomocí ozubeného řemene ve všech osách
LOŽISKA:	Vzduchová ložiska, isostatický vodící systém ve všech osách
ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM:	Lineární pravítka, rozlišení 0,0001 mm
VYVAŽOVÁNÍ:	Pneumatické vyvažování osy Z
TEPLOTNÍ KOMPENZACE:	Bezdrátový systém více snímačů pro osy stroje a měřenou součást

Strojní součásti

Na obrázku (Obr. 1) jsou znázorněny hlavní součásti, kterými je stroj tvořen. Jednotlivé součásti jsou sepsány dle označení v tabulce 2.

Tab. 2 Označení strojních součástí dle obrázku (Obr.1)

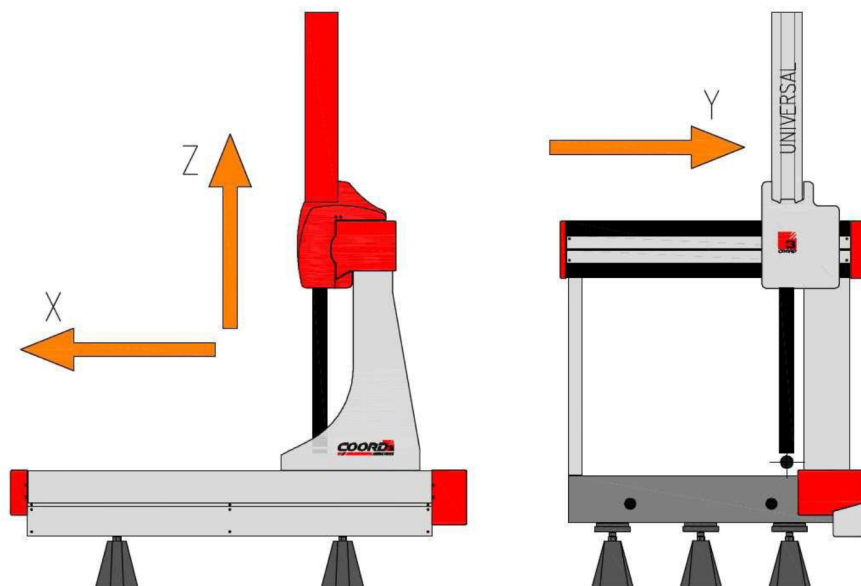
Č.	Popis
1	Hlavní štít
2	Kryt pinoly
3	Příčný nosník
4	Pravý doraz příčného nosníku
5	Pravá noha
6	Prachový kryt
7	Přední doraz osy X
8	Nohy stroje
9	Granitová deska
10	Levá noha
11	Zadní doraz osy X
12	Pinola
13	Levý doraz příčného nosníku



Obr. 1: Popis hlavních částí portálového souřadnicového měřicího stroje [2]

Označení a orientace os

Kartézská souřadná soustava a její uspořádání je znázorněno v níže uvedeném obrázku (Obr. 2). Šipka ukazuje směr plusové osy.



Obr. 2: Znáznornění uspořádání Kartézské souřadné soustavy portálového CMM - autor

2.1.2 Mostové souřadnicové měřicí stroje

Kontrola velkých součástí na souřadnicovém měřicím zařízení vyžaduje kombinaci velkých měřicích rozsahů a vysokou přesnost, kterou zajišťuje konstrukce s vysokou strukturální stabilitou u mostového souřadnicového měřicího stroje (Obr. 3). Tyto stroje je možné vybavit jak 3 nebo 5ti osým snímacím systémem, tak i laserovým liniovým skenerem. [2] str. 31.



Obr. 3: Mostový souřadnicový měřicí přístroj COORD3 MCT NT [2]

2.1.3 Horizontální souřadnicové měřicí stroje

Horizontální souřadnicové měřicí stroje (Obr. 4) se využívají především pro globální automobilový průmysl a jeho subdodavatele. Tyto měřicí stroje s horizontálními rameny jsou ideálním řešením pro měření tenkostěnných komponentů, jako jsou karoserie automobilů, plechové panely, dveře vozidel, sklo a palubní desky. Tyto systémy jsou převážně k dispozici ve verzích s jedním nebo dvěma rameny a mohou být také vybaveny s granitovým základem, liti-
novou deskou nebo mohou být zapuštěny přímo do podlahy. Stroje jsou ideální pro aplikace vyžadující instalaci mimo metrologickou místnost. [2] str. 32.



Obr. 4: Horizontální souřadnicový měřicí stroj COORD3 SWAN SI [2]

2.2 Mobilní provedení

Tyto jsou vhodné především pro měření velkých a objemných součástí, jejichž rozměry nebo konstrukce neumožňují snadné přemístění do měřicí laboratoře. V takových případech je zaveden měřicí přístroj přímo do výroby.

2.2.1 Měřicí ramena

Mobilní souřadnicové měřicí stroje (Obr. 5) v kombinaci s příslušným softwarem umožňují rychlé a komfortní měření pomocí CAD dat, které však nejsou nutné. Upnutí ramena přes přírubu může být na stole, na magnetu, trojnožce nebo vakuové přísavce, což má za výsledek, že měření lze provádět takřka kdekoli. Rameno disponuje vnitřním vyvažováním, klouby s neomezenou rotací a senzory přetížení, které zamezují vzniku chyb. Rameno se vyrábí v 6ti osém nebo 7mi osém provedení. Ramena v 6ti osém provedení umožňují měření pouze dotykovou sondou, oproti 7mi osému a 8mi osému provedení ramena, které umožňuje měření dotykovou sondou ale i skenování. Platí zde však pravidlo, že 7mi osé (8mi osé) ramena nedosahují takové přesnosti jako ramena 6ti osá, čehož je příčinou právě jeden kloub (dva klouby) navíc, a také čím delší rameno je, tím větší nepřesnost měření vzniká (Obr. 6). Ramena jsou vyráběna s průměrem měřicího rozsahu od 1,5 až 4 metrů. [2] str. 34.



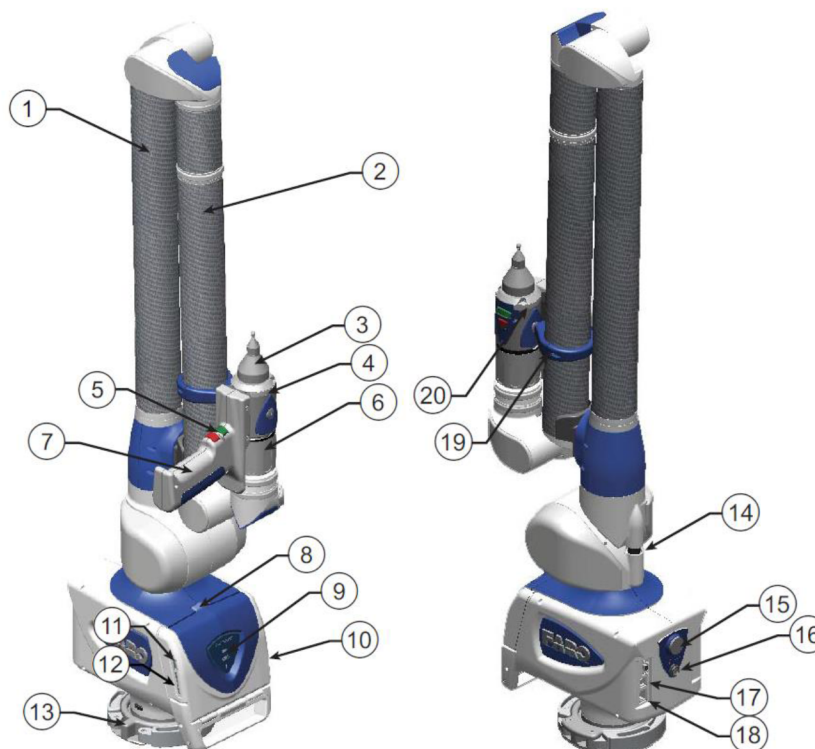
Obr. 5: Mobilní souřadnicový měřicí stroj FaroArm Quantum M [2]

Měřicí rozsah	SPAT ¹ (opakovatelnost)		E _{UNI} ² (přesnost)	
	6 os	7 os	6 os	7 os
Quantum ^s 1.5m	0.012mm		0.022mm	
Quantum ^s 2.5m	0.018mm	0.020mm	0.026mm	0.028mm
Quantum ^s 3.0m	0.027mm	0.032mm	0.038mm	0.050mm
Quantum ^s 3.5m	0.036mm	0.045mm	0.052mm	0.062mm
Quantum ^s 4.0m	0.045mm	0.055mm	0.063mm	0.076mm

Obr. 6: Výřez z tabulky znázorňující závislost přesnosti měření na poloměru měřicího rozsahu a typu provedení [2]

Strojní součásti

Na obrázku (Obr. 7) jsou znázorněny všechny hlavní strojní součásti, kterými je mobilní souřadnicový měřicí přístroj tvořen. Jednotlivé součásti jsou uvedeny dle označení v tabulce 3.



Obr. 7: Popis hlavních součástí mobilního souřadnicového měřicího přístroje FARO Quantum [2]

Tab. 3 Označení strojních součástí dle výše uvedeného obrázku (Obr. 7)

č.		č.	
1	Tubus 1	11	Port USB
2	Tubus 2	12	Port paměťové karty
3	Sonda	13	Příruba základny
4	LED na rukojeti	14	Nárazník
5	Tlačítka	15	Spínač ON/OFF
6	Rukojeť	16	Přípojka napájení
7	Odnímatelná 7mi osá rukojeť	17	Port USB
8	Magnetické tlačítko	18	Ethernet port
9	Stavový panel	19	Magnet pro uchycení rukojeti
10	Sklopný ovládací dotykový displej	20	LED na rukojeti

2.2.2 Laserové liniové skenery

Primární sondou každého ramena je dotyková sonda, avšak u ramen vyšších tříd (7mi osý, 8mi osý systém) je možnost osazení bezkontaktním liniovým laserovým skenerem. Dotyková sonda je ideální na měření primitivních geometrií vznikajících při třískovém obrábění, tedy po vrtání, soustružení, frézování atd. Bezkontaktní laserová sonda (Obr. 8) má výhody při snímání tvarově komplexních obecných ploch (formy, karosářské díly). [2] str. 35.



Obr. 8: Mobilní souřadnicový měřicí stroj FaroArm s laserovým liniovým skenerem [2]

2.2.3 Laser Tracker

Laser Tracker je přenosné a vysoce přesné měřicí zařízení s trojrozměrnými souřadnicemi a měřicím rozsahem až do 80 metrů. [2] str. 38.

Laser Tracker má dva otočné úhlové enkodéry (snímače úhlů) a laserový systém měření vzdálenosti. Souřadnice terčiku se určují změřením dvou úhlů a radiální vzdálenosti, kterou získá systém pomocí systému měření absolutní vzdálenosti. Paprsek se dokáže ve vzduchu okamžitě obnovit, pokud dojde k jeho přerušení. K přesnému měření radiální vzdálenosti také přispívá plně integrovaná povětrnostní stanice. Laser Tracker disponuje také přesným hladinovým snímačem, který zajišťuje přesné měření vektoru gravitace. Dále je vybaven dvěma barevnými MultiView kamerami, díky kterým má uživatel přehled o situaci a rovněž tyto kamery pomáhají zaměřit terčik po přerušení paprsku nebo během zachycování bodů. MultiView kamery jsou hlavní součástí technologie SmartFind, kdy systém lokalizuje a zaměří terčik poté, co uživatel pohne sondou SMR určitým způsobem nebo pomocí „gesta“. [2] str. 38

Systém Laser Tracker disponuje ochranou IP52 nebo vyšší, což zajišťuje bezproblémové používání vzhledem k vystavení působení vody nebo většího množství prachu v náročných průmyslových podmínkách. [2] str.38.

Strojní součásti

Na obrázku (Obr. 9) jsou označeny hlavní součásti přístroje Laser Tracker, jako jsou například zaměřovací osy, laser, optika, enkodéry, snímače tlaku a vlhkosti a podpůrná elektronika. Laser Tracker má spínací napájecí tlačítko a spínací tlačítko WLAN. Všechny tyto součásti jsou uvedeny v tabulce 4.



Obr. 9: Popis hlavních součástí na přístroji Laser Tracker FARO Vantage [4]

Tab. 4 Označení strojních součástí dle výše uvedeného obrázku (Obr.9)

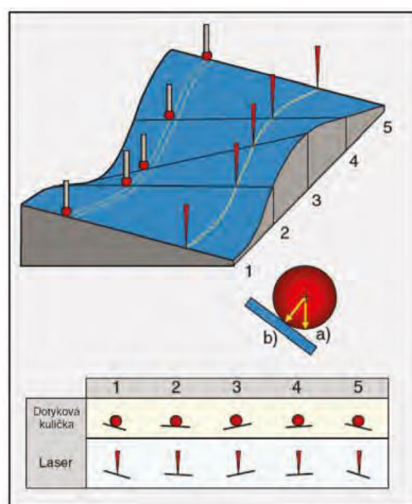
č.		č.	
1	Vysunovací zvedací rukojeť	11	Spínací tlačítko sítě WLAN
2	Indikační LED diody	12	Konektor síťového adaptéru
3	Otvor pro laser	13	Ethernetový konektor
4	MultiView kamery	14	Konektor pomocné skříně A
5	Výchozí poloha 1½" odražeče SMR	15	Konektor pomocné skříně B
6	Výchozí poloha 7/8" odražeče SMR	16	LED indikátor laseru
7	Výchozí poloha ½" odražeče SMR	17	LED indikátor systému
8	Válcový nástavec	18	Síťový LED indikátor
9	Upínací páka	19	Konektor snímače teploty
10	Spínací tlačítko	20	Spodní úchyt

3 PRŮBĚH MĚŘENÍ

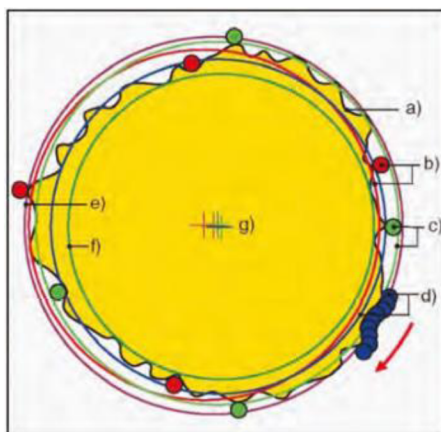
3.1 Taktilní měření

Taktilní neboli dotykové senzory získávají primární signál při mechanickém dotyku měřeného objektu speciálním dotykovým prvkem, většinou kuličkou. Od toho jsou odvozeny elektrické signály pro další zpracování. Rozlišují se spínací a skenovací dotykové systémy. Výsledek měření u dotykového senzoru obsahuje jak geometrii (tvar a velikost) měřicího prvku (kuličky), tak prostorovou pozici a geometrickou formu měřené plochy objektu. Pozici bodu dotyku u dotykového skenování získáme matematickou korekturou na základě známých souřadnic středu dotykové kuličky (Obr. 10). [1] str. 39.

Pro přesnou korekturu je nutno nejen změřit dotykový prvek (korekce dotykové kuličky) důkladně, ale také změřit dotykovým senzorem více bodů na geometrickém prvku, který se bude měřit. Chyba, která by vznikla na základě opomenutí této korektury, je závislá na průměru dotykové kuličky. Velké průměry dotykové kuličky mohou způsobit potlačení menších odchylek struktury povrchu. Počet dotykových bodů má zásadní vliv na výsledek měření (Obr. 11). U skutečných geometrických prvků s odchylkami tvaru je nutné zaznamenat velký počet měřených bodů. To je u spínacích senzorů kvůli časové náročnosti problematické. [1] str. 40.



Obr. 10: Vliv tvaru dotykového prvku při měření zakřivených povrchů [1]



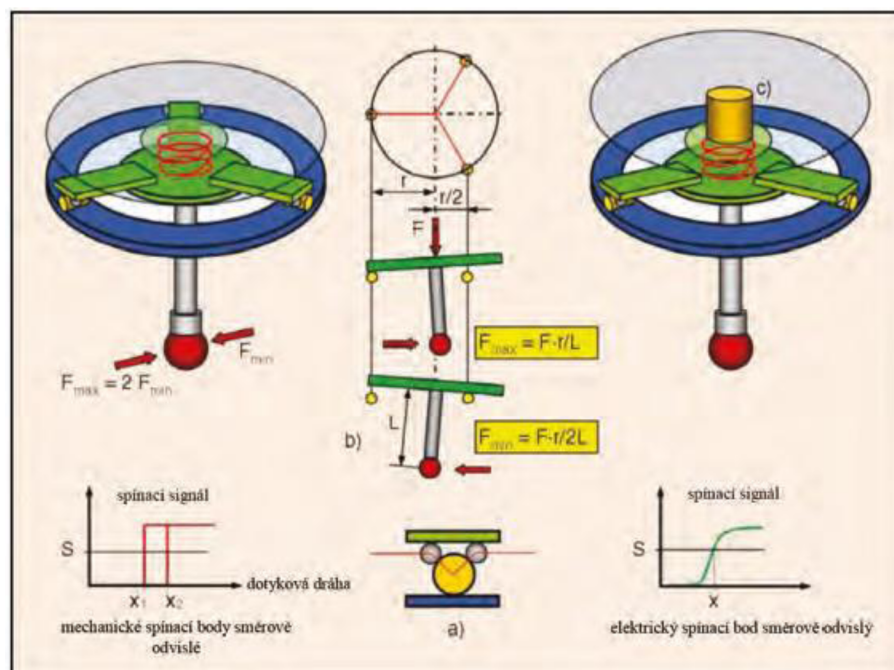
Obr. 11: Vliv počtu a polohy dotykových bodů na výsledek měření na objektu s odchylkou tvaru [1]

3.1.1 Spínací dotykové senzory

Jednoduché spínací dotykové systémy pracují na principu stavivu (Obr. 12 vlevo). Po dotyku dotykové kuličky a objektu dojde k vygenerování signálu a načtení pozice. Měřený bod vylpne ze souřadnic měřicího přístroje a vztahuje se ke středu dotykové kuličky. Nevýhodou tohoto systému spočívá v tom, že síly dotyku jsou závislé na směru dotyku, což vede k různým prohnutím dotykového prvku a má to za následek vznik nezanedbatelné odchylky dotyku závislé na směru, kterou lze jen obtížně korigovat. [1] str. 41.

Kvalitnější dotykové systémy využívají pro přeměnu mechanického signálu v elektrický signál transformátorové prvky jako jsou piezo-elektrické prvky nebo tenzometry (Obr. 12 vpravo). U těchto dotykových systémů nevzniká odchylka dotyku závislá na směru pohybu. Využití elektroniky má také za následek, že je možné pracovat s velmi malými silami dotyku. Taktéž nejistota měření ovlivněná senzorem je nižší. [1] str. 41.

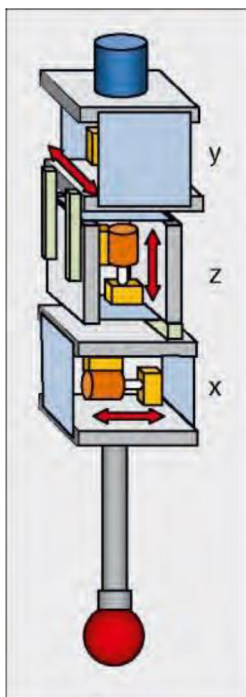
Společnou nevýhodou spínacích dotykových systémů je fakt, že stroj pro souřadnicové měření je uveden v kontakt s objektem za účelem určení měřicího bodu a následně kontaktní bod opět opustí. Na základě toho vznikají pro každý bod měření prodlevy v řádech několika sekund. Naopak hlavní výhodou spínacího dotykového systému je relativně nízká cena a menší rozměry v porovnání s jinou alternativou dotykového systému. [1] str. 42.



Obr. 12: Spínací dotykové senzory: princip s mechanickými kontakty (vlevo), princip s dotykově elektrickým měničem (vpravo) [1]

3.1.2 Skenovací dotykové senzory

Senzor skenovacího dotykového systému (Obr. 13) umožňuje kontinuální měření ve všech souřadnicových osách. Tyto skenovací systémy zajišťují při vychýlení dotykové kuličky informaci o poloze měřicího bodu. Kromě toho je nezbytná již výše zmíněná korektura dotykové kuličky, odpovídající poloze normálového vektoru plochy měřené dotykem a prohnutí dřívku. Kompletní průběh dotykového měření lze zaznamenat a následně z něj určit dotykový bod pro předpokládané nulové vychýlení (dotyková síla 0 N). Této vlastnosti se využívá především při měření ohebných dílců. [1] str. 43



Obr. 13: Skenovací dotykový senzor: skenovací senzory ve směru X, Y a Z. [1]

3.2 Laserové senzory

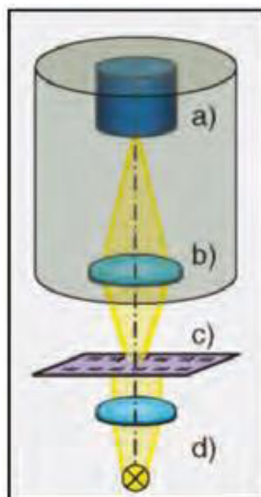
Laserové senzory při skenování zpracovávají obraz tak, že se snímky během snímání kontur automaticky seskupí a spojí se do celkové kontury. Skenované kontury jsou omezeny pouze měřicím rozsahem souřadnicového měřicího přístroje, nikoliv však senzorem. [1] str. 10.

Laserový bodový senzor má výhodu především v rychlosti měření. Tímto způsobem je možné změřit několik stovek až tisíc bodů za sekundu. Takový senzor se využívá především pro měření kontur na povrchu dílců nebo pro kontrolu rovinnosti usazení s nízkou nejistotou měření několika mikrometrů. Také se využívá v oblasti měření nástrojů k měření úhlu čela a hřbetu nebo poloměru hrany. [1] str. 29.

Měření senzorem s laserovou čočkou je převedeno na dvourozměrné. Laserový paprsek je veden pohyblivým zrcadlem k hlavě senzoru, čímž tvoří linii. Vyhodnocení probíhá za pomoci maticové kamery, která zajišťuje získání výsledku pomocí triangulace pro více bodů současně. Tímto se změří řez na povrchu měřeného objektu. Pro snímání trojrozměrného povrchu se umístí senzor se souřadnicovým měřicím přístrojem kolmo k rovině řezu. Tento senzor umožní rychlé změření větších ploch s relativně velkou nejistotou měření přibližně 0,01 mm. [1] str. 29.

3.2.1 Optické senzory

Vizuální měření způsobuje subjektivně podmíněné odchylky měření. Součástí toho jsou i paralaxní chyby (křivý náhled) a chybná měření přechodů mezi světlými a tmavými místy. Vizuální měření se používá především v případech, kdy jsou měřené struktury špatně viditelné a geometrické znaky lze nalézt pouze intuitivně, proto dnes přebírají úlohu zraku při měření optoelektrické senzory. Laterálně měřicí senzory určují odchylku bodů na objektu od osy senzoru. Za tímto účelem se většinou měřený objekt nasvítí a objektivem se jeho snímek přenesení na senzor (Obr. 14). [1] str. 11.



Obr. 14: Princip laterálně měřicího senzoru s optickým zobrazením objektu [1]

4 ANALÝZA VYUŽÍVÁNÍ METOD PRO VYROVNÁNÍ NOMINÁLNÍCH DAT NA CAD MODELU PŘI MĚŘENÍ NA CMM

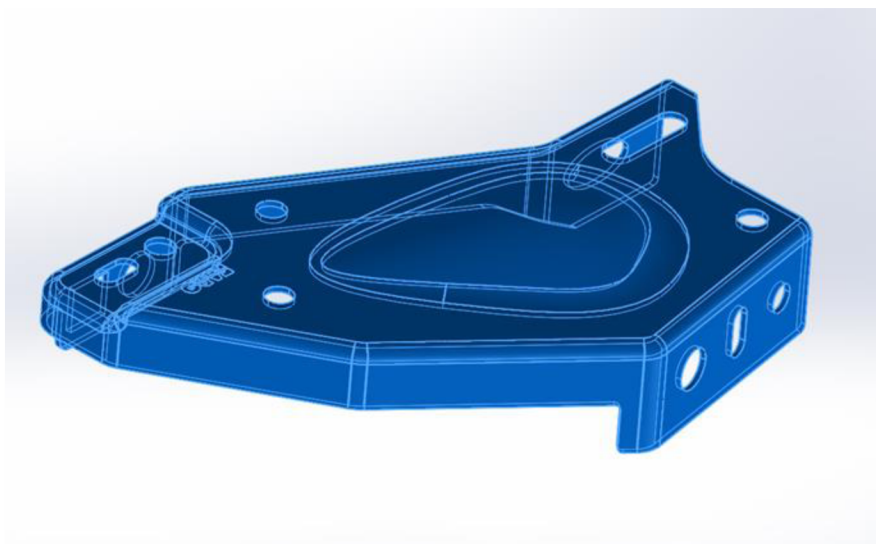
Vyrovnání je operace, během níž objekt, který sestává z naměřených dat, mění polohu a orientaci tak, aby byl uveden do souřadnicového systému referenčního objektu. Během vyrovnání lze využít celou řadu nástrojů. [3] str. 117.

Metody vyrovnání a volba prvků pro vyrovnání má zásadní vliv na naměřené výsledky. Proto je nezbytné, aby na výkresech byl vždy konstruktéry nebo technologi definován způsob vyrovnání a zároveň byly vyznačeny prvky, které mají být pro vyrovnání použity. V případě, že by tyto informace na výkrese nebyly uvedeny, mohlo by dojít k tomu, že např. metrolog by na ranní směně vyhodnotil díl jako správný a jiný metrolog by na odpolední směně tentýž díl vyhodnotil jako nesprávný. Důvodem by bylo to, že nebyla stanovena metoda vyrovnání a každý operátor si zvolil sám jak metodu, tak i prvky dle svého vlastního uvážení.

Mezi běžné vyrovnávací nástroje, které se používají k vyrovnání datových objektů s referenčními objekty, patří zejména vyrovnání pomocí informací o povrchu, pomocí funkcí, pomocí referenčních cílů a v neposlední řadě vyrovnání pro vyrovnání snímacího zařízení s referenčním objektem. [3] str. 117

4.1 Vyrovnání pomocí informací o povrchu

Při skenování datových objektů v různých pozicích zařízení je užitečné vyrovnat datové objekty navzájem, k čemuž se využívá metody Best-fit (Obr. 15). Tato metoda interaktivně přenesou polohu a orientaci datového objektu tak, aby minimalizovala odchylky jednotlivých bodů povrchů. [3] str. 121



Obr. 15: Metoda vyrovnání Best-fit - autor

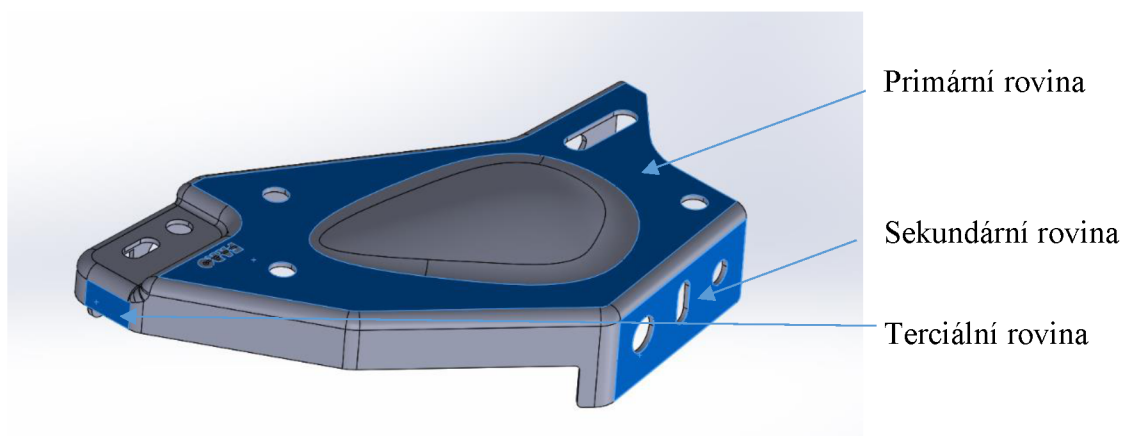
4.2 Vyrovnání pomocí funkcí

Vyrovnání spočívá ve vytváření prvků, jejichž nominální hodnoty jsou vytvořeny v referenčním objektu a naměřené hodnoty jsou v měřeném objektu. Následně pak dochází k vyrovnání změřených a nominálních hodnot, k transformaci polohy a orientaci měřeného objektu v prostoru. [3] str. 128.

Existují tři základní metody vyrovnání založených na prvcích.

4.2.1 Metoda vyrovnání pomocí tří rovin

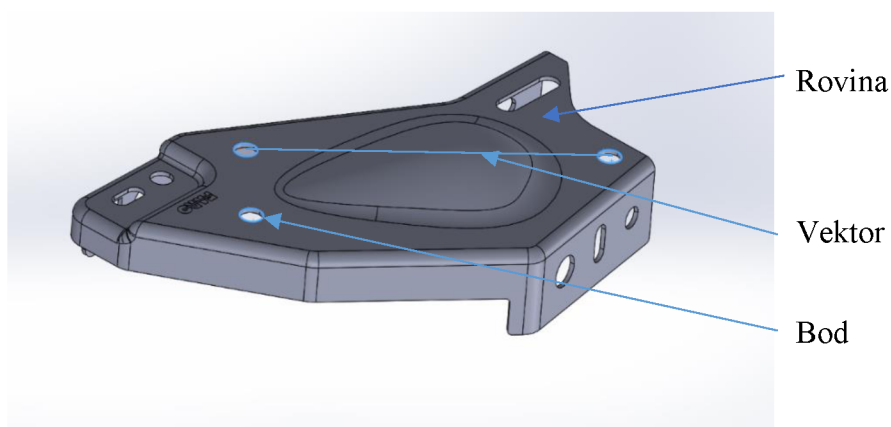
Při tomto způsobu vyrovnání je volena primární, sekundární a terciální rovina (Obr. 16). Primární rovina odebírá tři stupně volnosti, sekundární rovina odebírá dva stupně volnosti a terciální rovina odebírá poslední stupeň volnosti. [3] str. 133.



Obr. 16: Metoda vyrovnání pomocí tří rovin - autor

4.2.2 Metoda vyrovnání pomocí roviny, vektoru a bodu

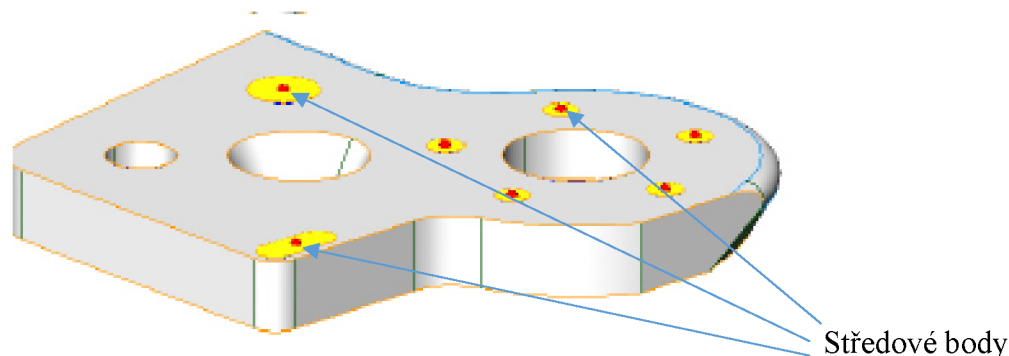
Tato metoda k vyrovnání jako první volí rovinu, která odebírá tři stupně volnosti, následně volí vektor, který odebírá dva stupně volnosti a poslední stupeň volnosti odebírá zvolený bod (Obr. 17). [3] str. 129.



Obr. 17: Metoda vyrovnání pomocí roviny, vektoru a bodu - autor

4.2.3 Metoda vyrovnání pomocí středových bodů

Tato metoda vyrovnání volí středové body rovinných prvků (Obr. 18). K vyrovnání je potřeba tří a více párů prvků, které lze redukovat na bod. Bodově redukovatelný prvek je prvek se středovým bodem, jako je kruh, štěrbina nebo koule. [3] str. 131



Obr. 18: Metoda vyrovnání pomocí středových [3]

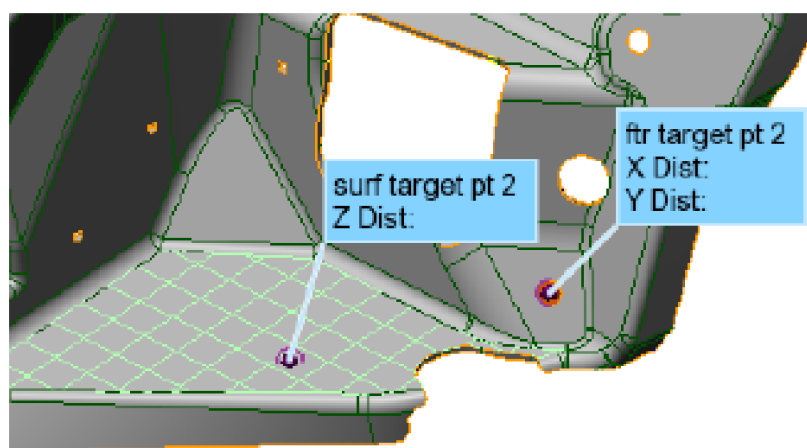
4.3 Metoda vyrovnání s referenčními cíli

Za referenční cíle jsou považovány body nebo čáry, které lze použít k omezení vyrovnání podél určeného směru. Ty se běžně vyskytují ve výkresech plechových součástí, jakož i ve výkresech forem, kde jsou stanoveny specifické souřadnice součásti a jsou stanoveny směry podél standardních os pro vyrovnání. [3] str. 135.

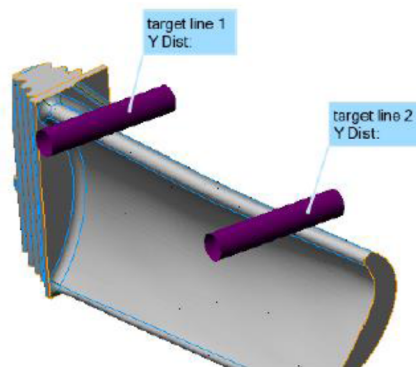
Referenční cíle jsou obvykle vytvářeny na referenčním objektu. Jakmile je tento referenční objekt v požadované poloze, může dojít k měření referenčních cílů a k jejich následnému vyrovnání. [3] str. 135.

Referenční cílové body (Obr. 19) jsou umístěny v přesných souřadnicích a vyrovnávají získaný datový objekt podél směrů vyrovnání. Referenční cílové čáry (Obr. 20) jsou vytvořeny z rysů čáry a zajistí vyrovnání podél pólu nebo ostré hrany. [3] str. 135.

Referenční cíle je možné získat ze skenovaných dat. Získaný datový objekt musí být těsně vyrovnán s referenčním objektem, aby měření referenčního cíle bylo úspěšné. [3] str. 135.



Obr. 19: Referenční cílové body [3]

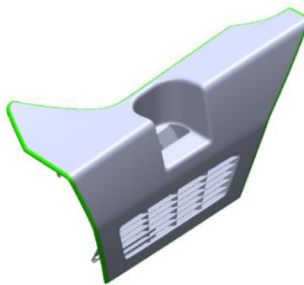


Obr. 20: Referenční cílové čáry [3]

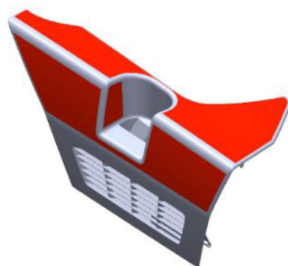
5 NEJČASTĚJŠÍ VADY VZNIKLÉ PŘI VYROVNÁNÍ MĚŘENÍ NA CAD MODEL

5.1 Vady způsobené špatnou metodikou vyrovnání

Nevhodné zvolení metody, podle níž bude prováděno vyrovnání, se ve výsledném vyhodnocení naměřených dat ztlačně projeví. To, která metoda je vhodnější, se odvíjí od toho, které geometrické prvky na měřeném dílu jsou konstrukčního charakteru, a tudíž i primární z hlediska funkčnosti samotného dílu. Proto vzhledem na konkrétní měřený díl může být zvolení například metody Best-fit méně vhodnější než zvolení metody středových bodů. Na níže uvedeném obrázku (Obr. 21) byla správně zvolena metoda vyrovnání s referenčními cíli, jelikož právě zvolené prvky jsou zásadní, aby demonstrováný plastový díl správně lícoval s okolním prostředím, do kterého má být vsazen. Zatímco na následujícím obrázku (Obr. 22) je demonstrováno špatné zvolení metody tří rovin. Metoda tří rovin je v tomto případě považována za špatnou především proto, že barevně vyznačené roviny nemají vliv na funkčnost tohoto dílu.



Obr. 21: Správně zvolena metoda vyrovnání [6]



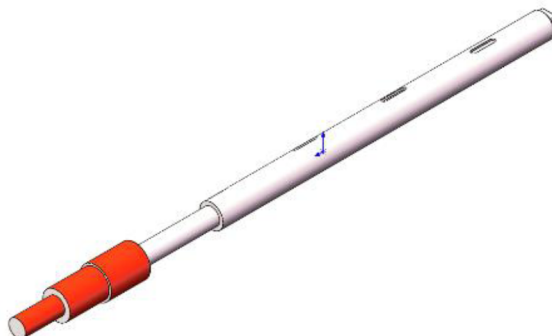
Obr. 22: Špatně zvolena metoda vyrovnání [6]

5.2 Vady způsobené špatným výběrem prvků

Výběr prvků se taktéž po vyrovnání projeví ve výsledném vyhodnocení naměřených dat. Především pokud to jsou prvky, jejichž rozměry nejsou tolerovány. Pro příklad: pokud je prováděno vyrovnání metodou tří rovin a vybrané roviny nejsou obrobeny, výsledné naměřené hodnoty budou kvůli takovým rovinám zkresleny. Proto je pro správnost měření zásadní, aby byly vybrané prvky, které mají tolerované rozměry, přesně obrobeny (např. funkční plochy). Správně vybraný prvek se odvíjí také od celkové konstrukce měřené součásti. Například na uvedeném obrázku (Obr. 23) je znázorněn správný výběr prvků (zelená barva), jelikož u takové hřídele je důležité, aby vybrané prvky byly v celém rozsahu její délky. Pokud by byly vybrány prvky jako na následujícím obrázku (Obr. 24), kde jsou znázorněny červenou barvou, výsledky měření na vzdálenějším konci hřídele by byly značně zkresleny.



Obr. 23: Správně vybrané prvky k vyrovnání - autor



Obr. 24: Špatně vybrané prvky k vyrovnání – autor

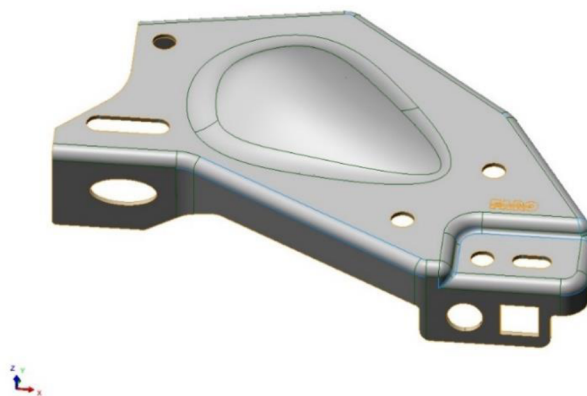
6 STUDIE MĚŘENÍ

Pro studii měření byl zvolen referenční díl, který byl vyroben vypalováním ocelového plechu. Následně byl díl tvářen. Jelikož součástí dílu byly i geometrické prvky, jejichž rozměry byly tolerovány, bylo nutné, aby tyto prvky byly následně obrobeny. Plechový referenční díl byl prvně naskenován systémem FARO Arm Quantum S2,5 s laserovým skenerem LLP HD. Měřicí rameno disponovalo měřicím rozsahem 2,5 metru. Délková přesnost měřicího ramene byla 0,032 mm. Rameno bylo osazeno laser-liniovým skenerem o záběru 80-150 mm. Rozlišení tohoto skeneru bylo 2000 bodů/lince a při snímkovací frekvenci 300 snímků/sekundu bylo možné zachytit 600000 bodů/sekundu. Přesnost celého měřicího ramene s laserovým skenerem je 0,048 mm. Měření probíhalo v laboratoři při teplotě 22°C, tlaku 967,6 kPa a vlhkosti 45%. [5] str. 4.

Naměřená data byla zachycena v software Polyworks Inspector Premium 2020, ve kterém byla veškerá naměřená data zpracována. Následně byl sken (Obr. 25) ve zmíněném software vyrovnán čtyřmi metodami na původní CAD model (Obr. 26). Jednalo se o metody Best-fit, metoda rovina-vektor-bod, metoda tří rovin a metoda středových bodů. U každé metody bylo také provedeno vyhodnocení barevné mapy odchylek doplněné o pozice geometrických tvarů, vyskytujících se na referenčním dílu.



Obr. 25: Sken referenčního dílu – autor



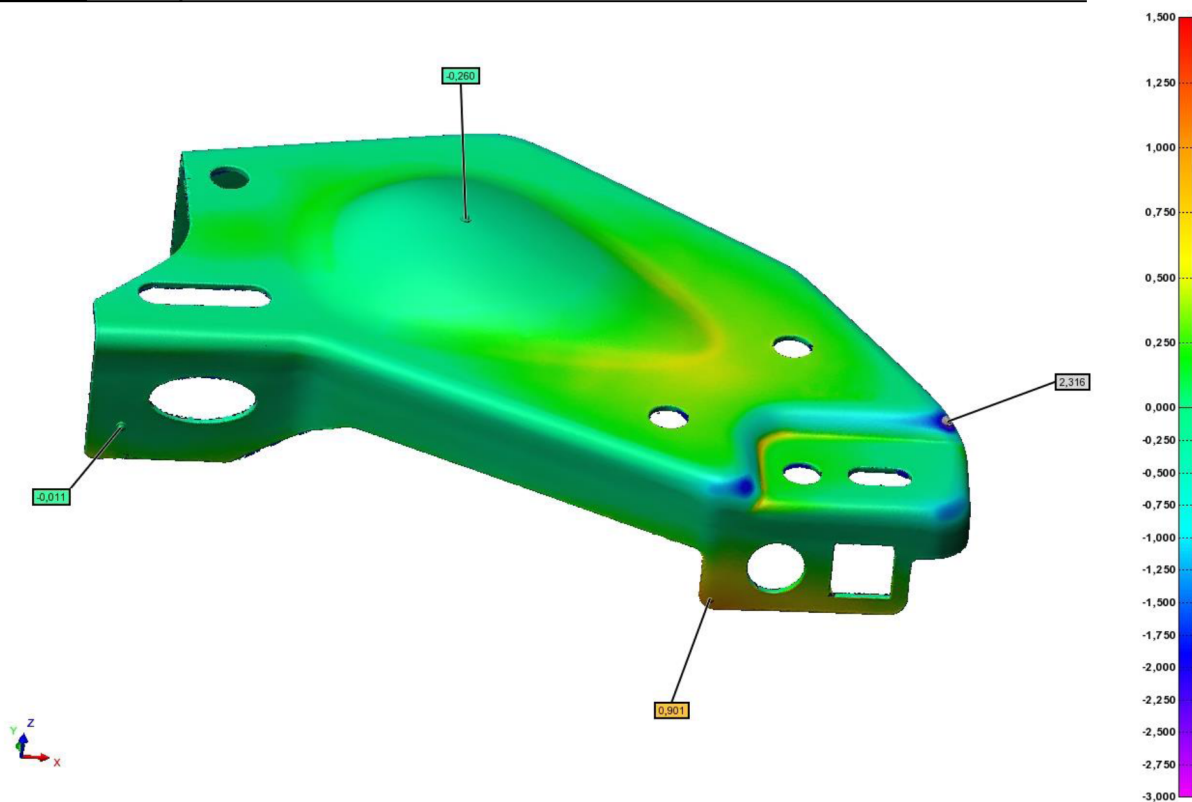
Obr. 26: CAD model referenčního dílu - autor

6.1 Vyrovnání metodou Best-fit

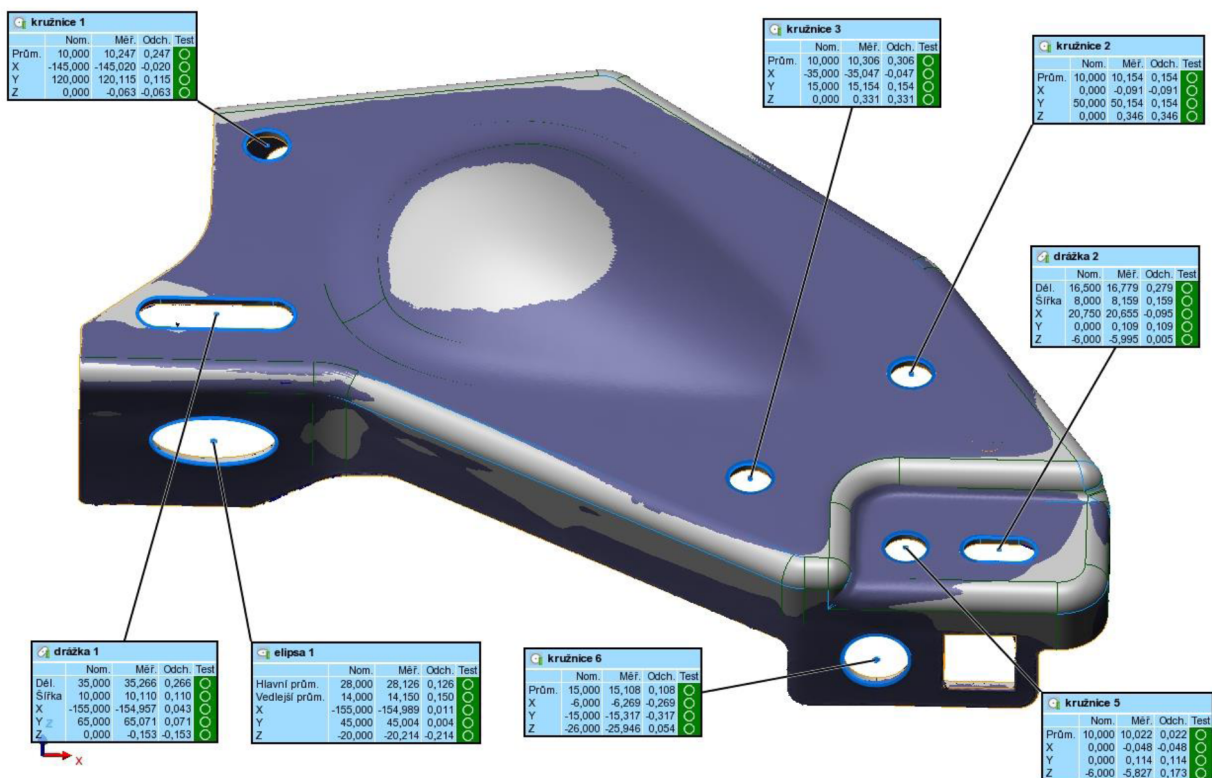
Po provedení vyrovnání metodou Best-fit byl posazen sken dílu na CAD model (Obr. 27). K vyrovnání byly použity všechny plochy. Šedá barva na obrázku znázorňuje CAD model a fialová barva naskenovaný díl, z čehož jsou zřejmá místa, kde vystupuje sken a kde naopak vystupuje CAD model. V následujících obrázcích je znázorněno vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání (Obr. 28) a vyhodnocení pozice geometrických prvků (Obr. 29).



Obr. 27: Vyrovnání skenu na CAD model metodou Best-fit - autor



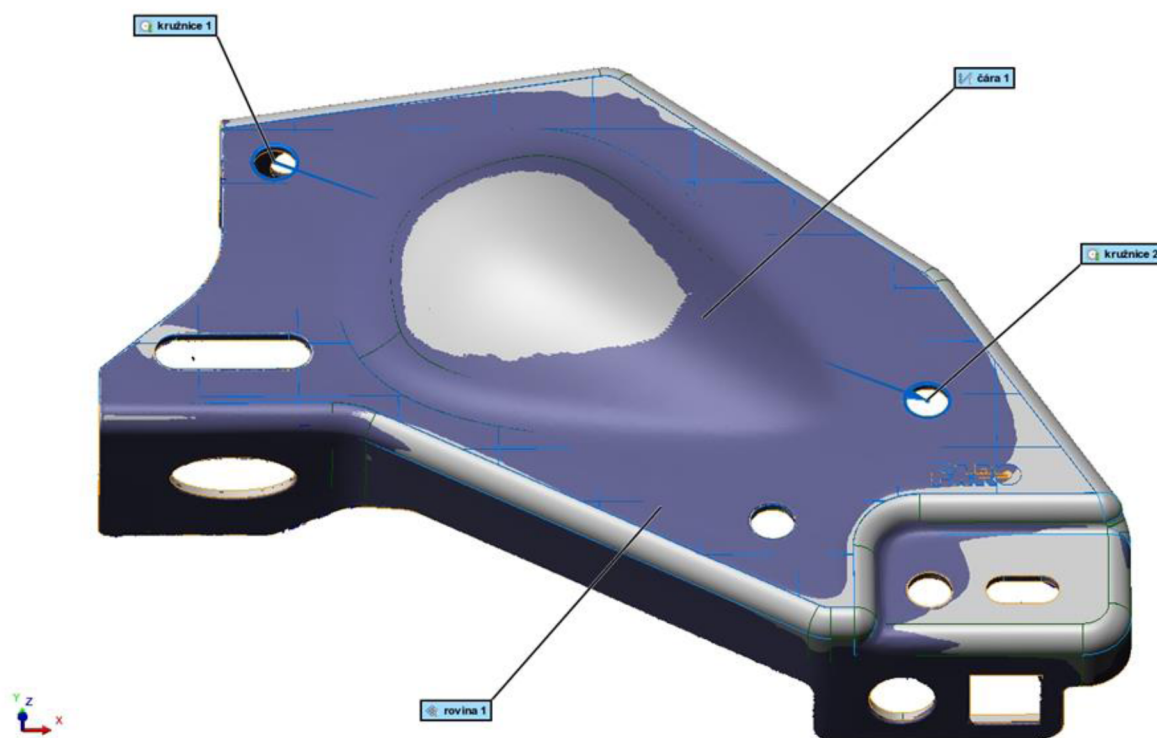
Obr. 28: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou Best-fit - autor



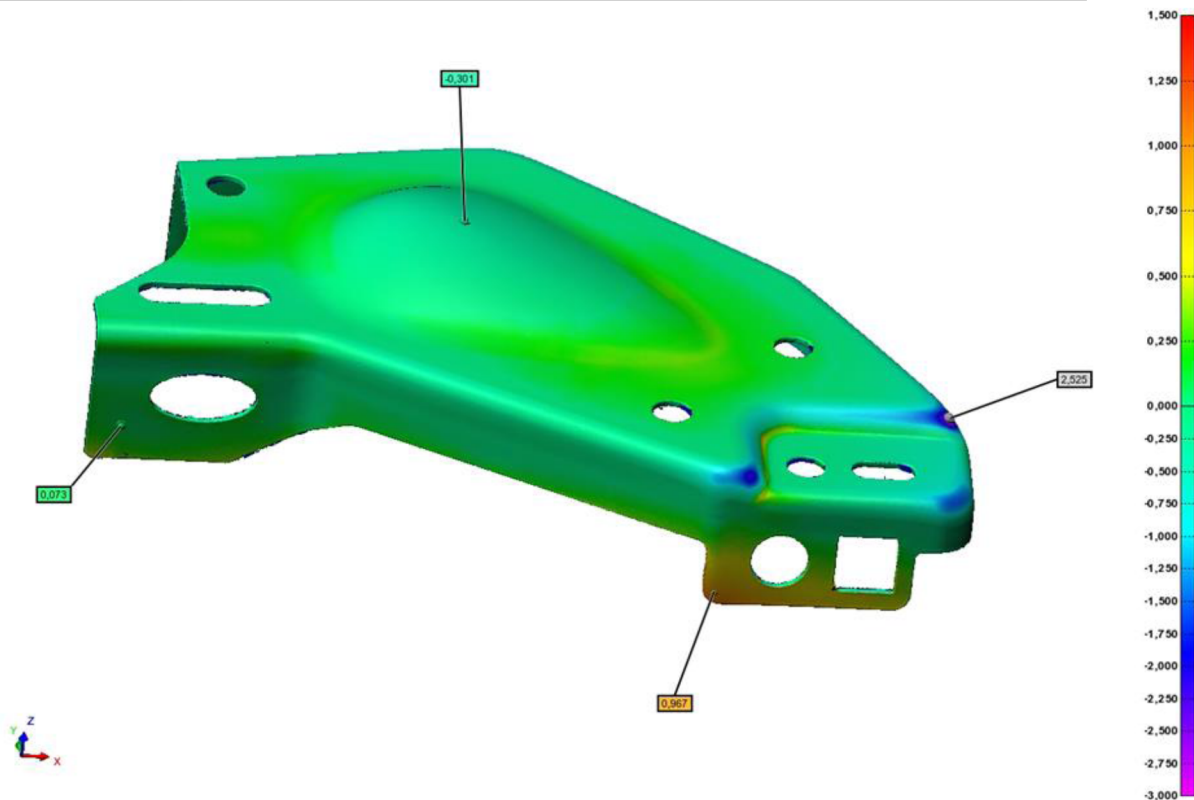
Obr. 29: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou Best-fit – autor

6.2 Vyrovnání metodou rovina–vektor–bod

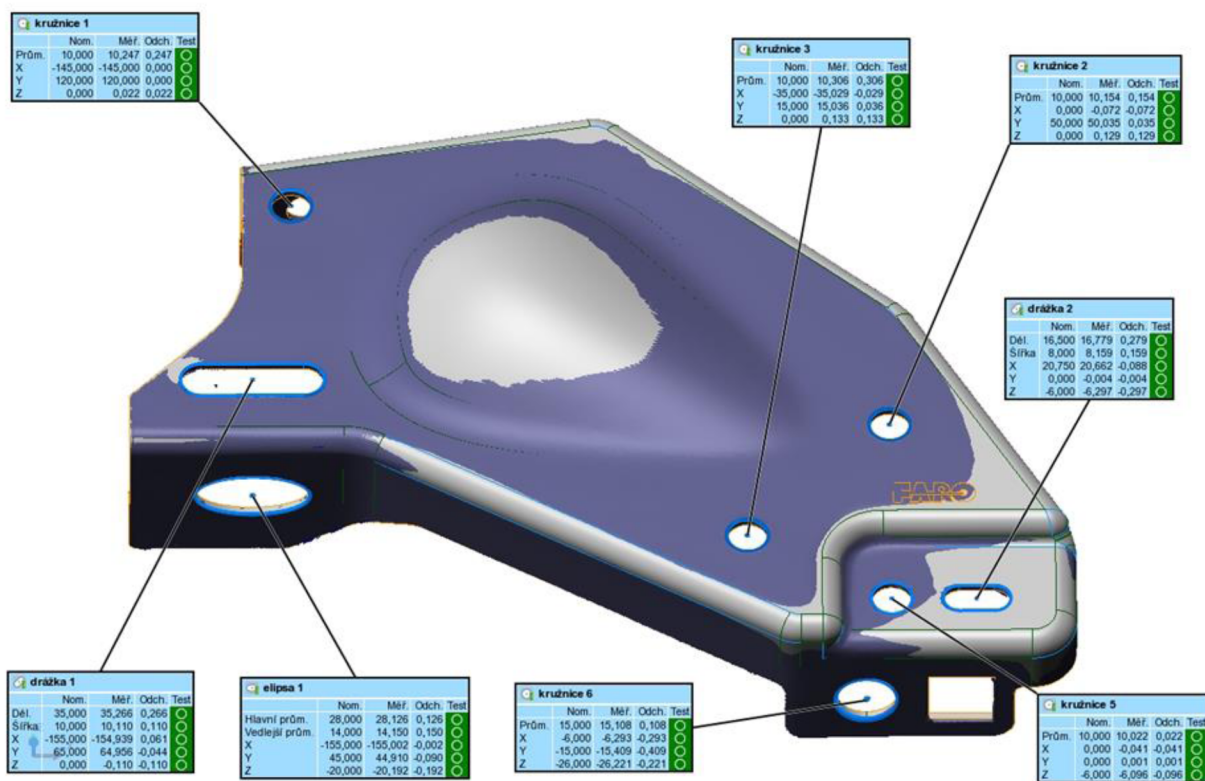
Při vyrovnání metodou rovina-vektor-bod byla vybrána rovina 1 (rovina), která odebrala tělesu tři stupně volnosti, poté čára 1 (vektor), která tělesu odebrala další dva stupně volnosti a jako poslední byla vybrána kružnice 1 (bod), která odebrala poslední stupeň volnosti. Následně byl opět posazen sken referenčního dílu na CAD model (Obr. 30), z čehož jsou zřejmá místa, kde vystupuje sken dílu (fialová místa) nebo CAD model (šedá místa). Stejně jako u předchozí metody, tak i u této bylo provedeno vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání (Obr. 31), a taktéž vyhodnocení pozice geometrických prvků (Obr. 32), kde se projevilo, že k vyrovnání byla zvolena kružnice 1, tudíž její odchylky pozic po vyhodnocení byly rovny nule.



Obr. 30: Vyrovnání skenu na CAD model metodou rovina-vektor-bod - autor



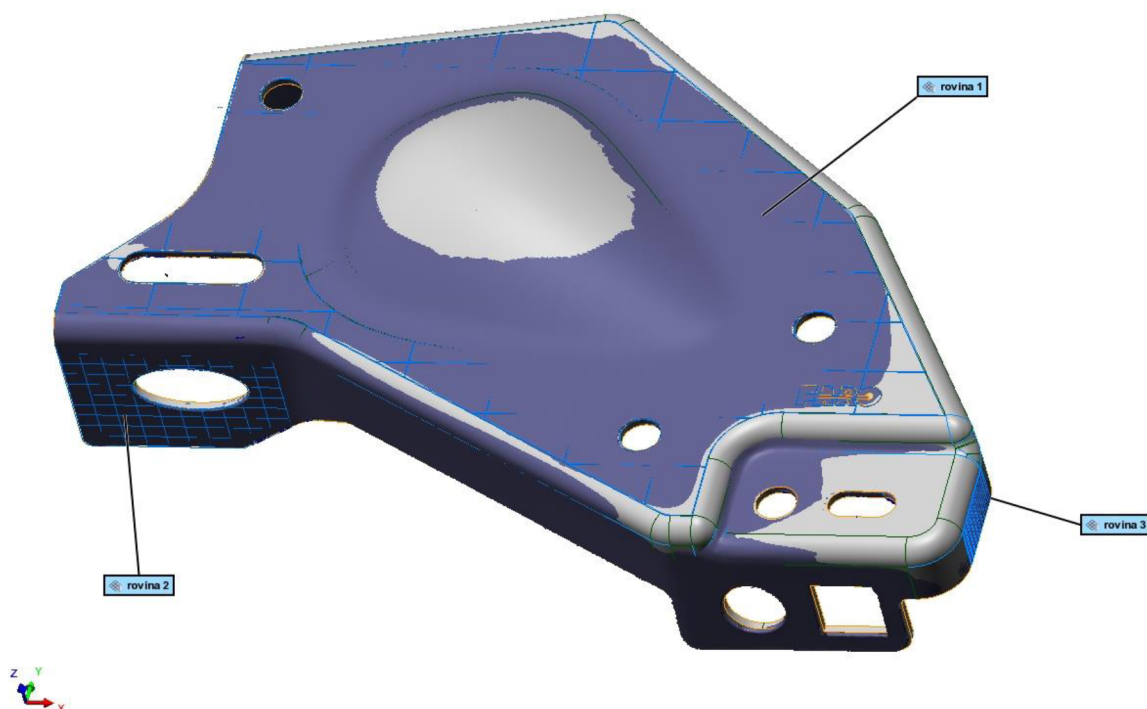
Obr. 31: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou rovina-vektor-bod - autor



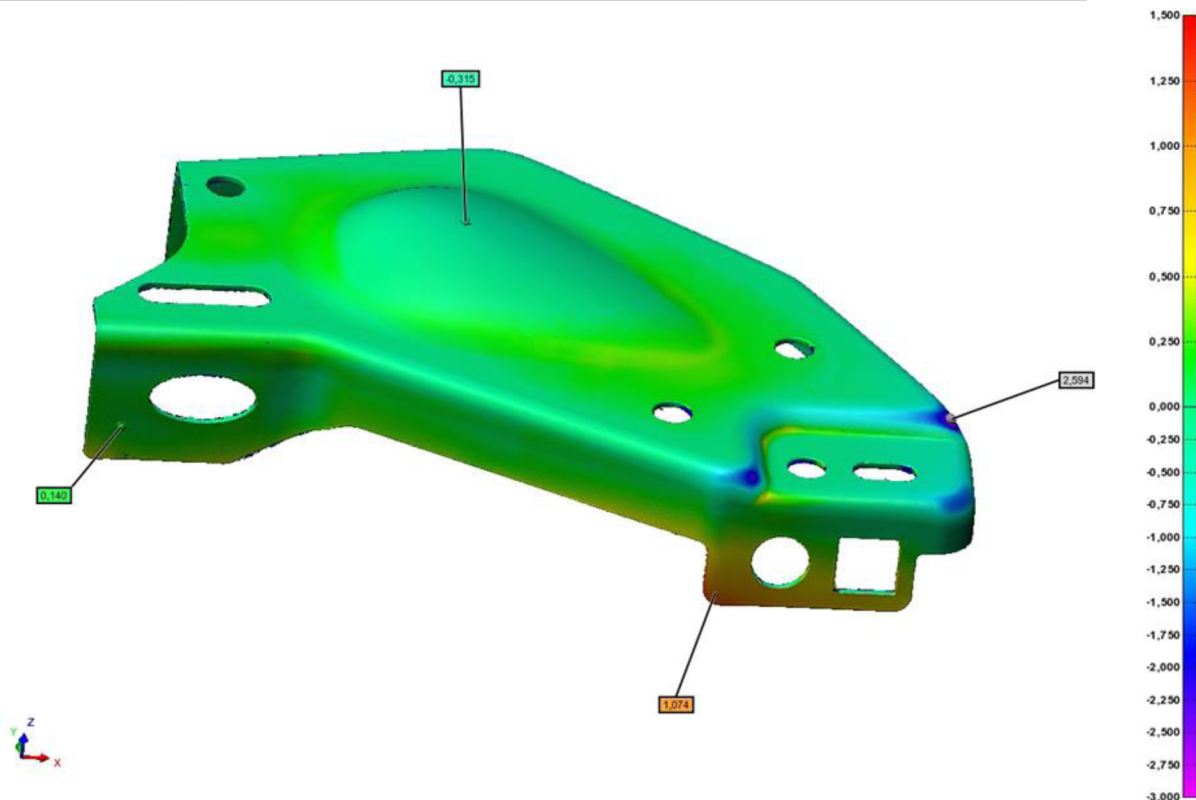
Obr. 32: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou rovina-vektor-bod – autor

6.3 Vyrovnání metodou tří rovin

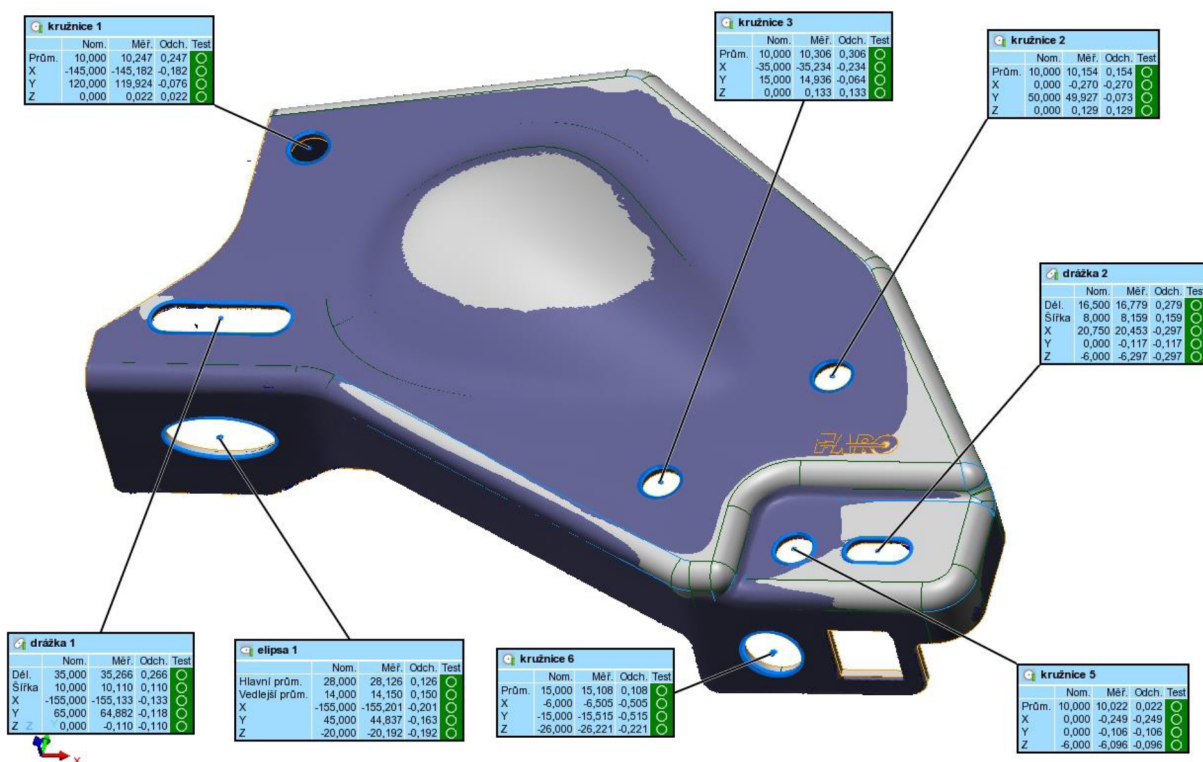
Pro vyrovnání metodou tří rovin byla vybrána nejdříve rovina 1, která odebrala tělesu tři stupně volnosti, poté rovina 2, která odebrala další dva stupně volnosti a jako poslední byla vybrána rovina 3, která odebrala poslední stupeň volnosti. Rovněž i při vyrovnání touto metodou bylo provedeno posazení skenu referenčního dílu na CAD model (Obr. 33). Prolínání šedé (CAD model) a fialové (sken dílu) barvy na obrázku znázorňuje místa, kde vystupuje CAD model a kde naopak sken dílu. Dále bylo provedeno taktéž vyhodnocení barevné mapy odchylek (Obr. 34) a vyhodnocení pozice geometrických prvků (Obr. 35) při použití metody tří rovin.



Obr. 33: Vyrovnání skenu na CAD model metodou tří rovin – autor



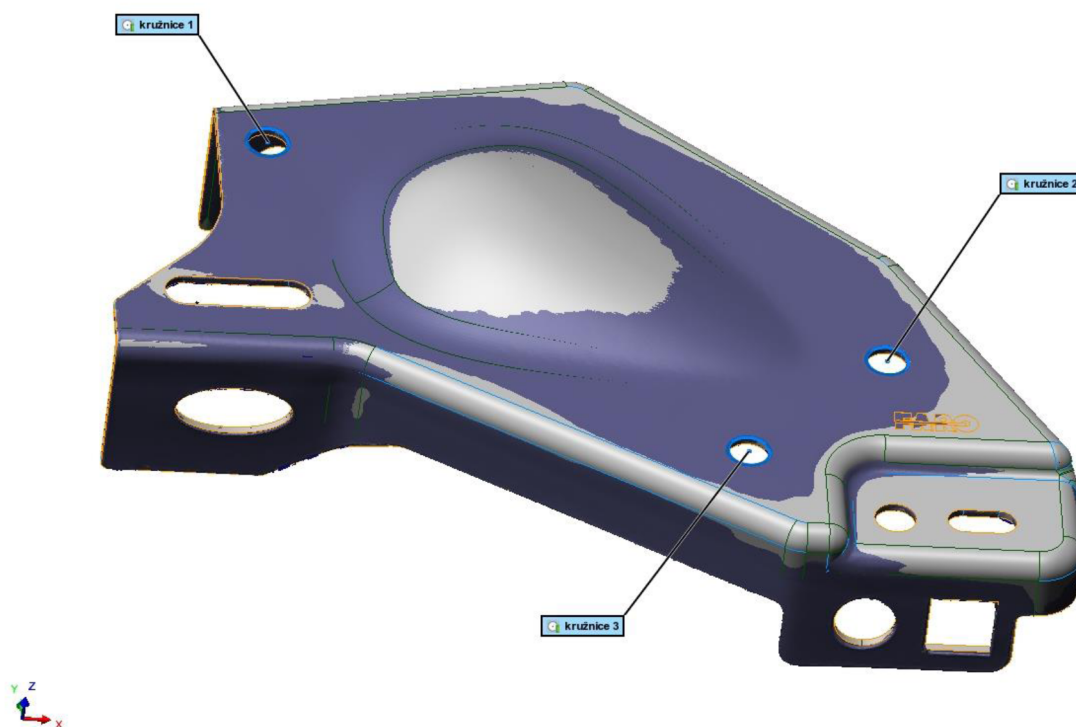
Obr. 34: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou tří rovin - autor



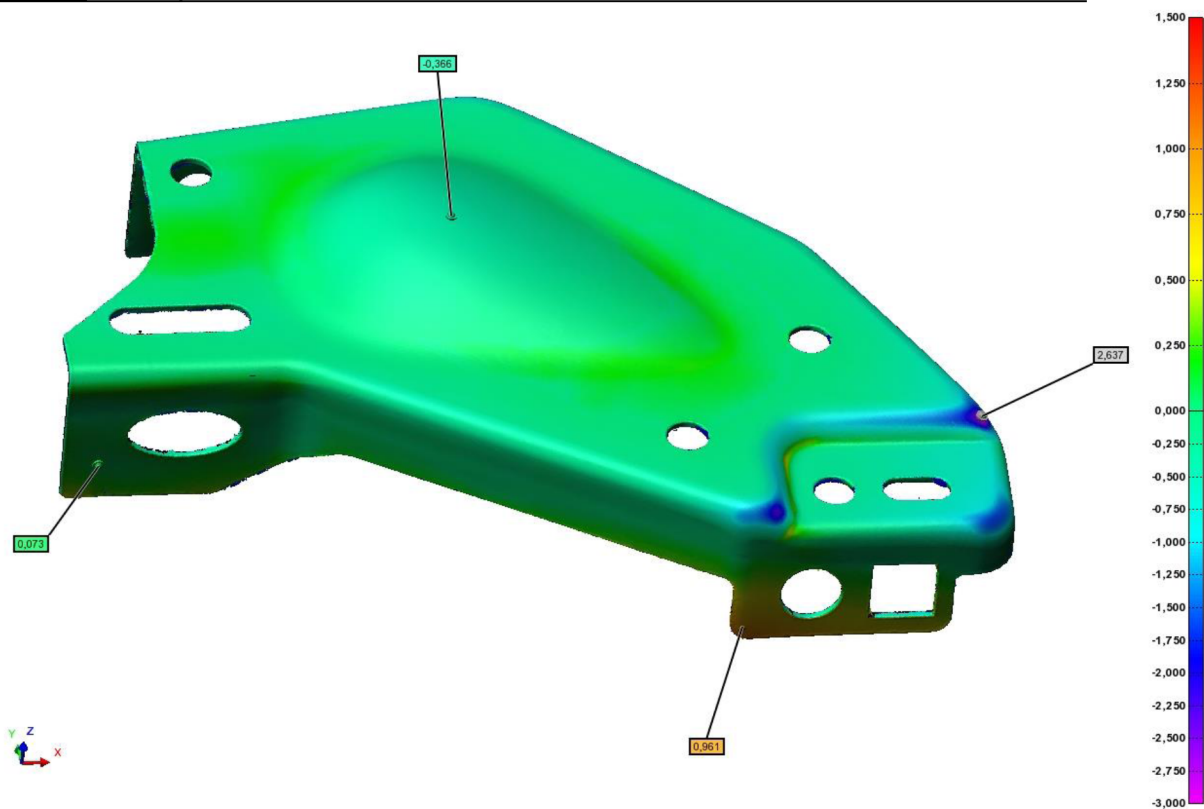
Obr. 35: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou tří rovin - autor

6.4 Vyrovnání metodou středových bodů

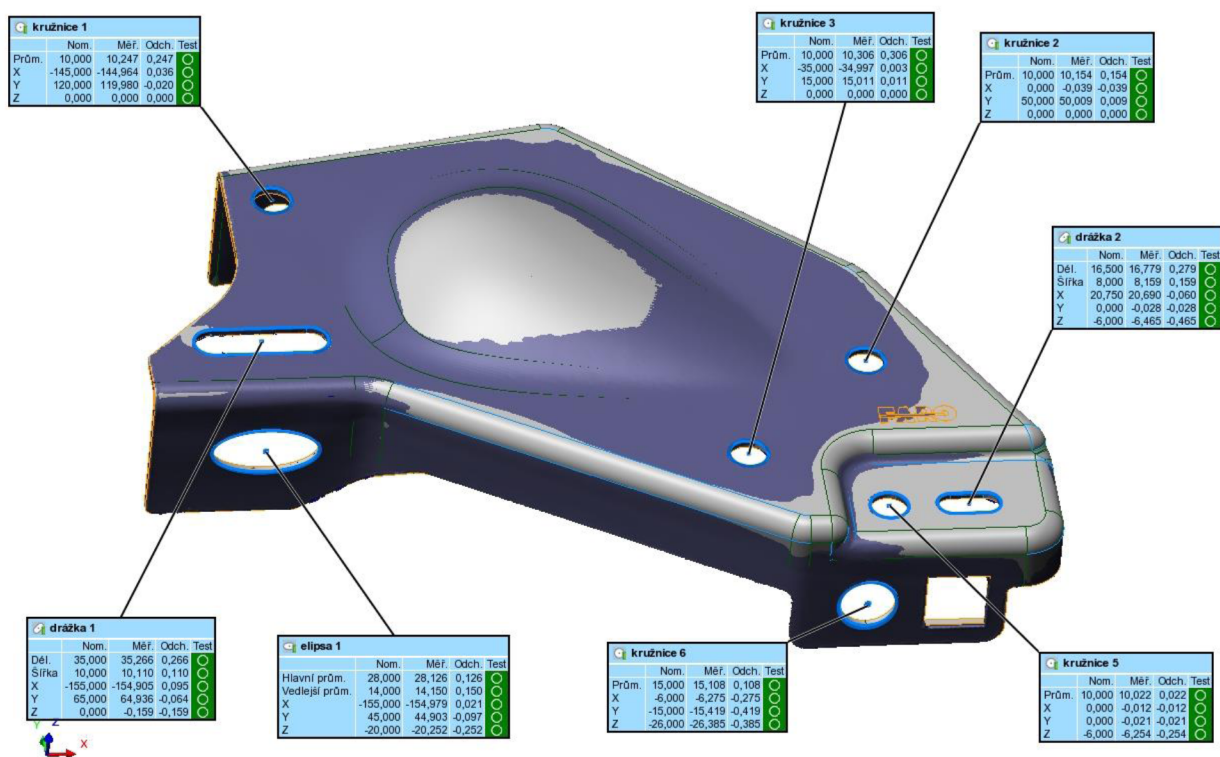
Metoda středových bodů byla poslední z metod, které byly pro vyrovnání zvoleny v průběhu studie měření. K vyrovnání byla vybrána kružnice 1, kružnice 2 a kružnice 3, protože jejich rozměry jsou tolerovány (viz Obr. 43). Sken byl opět posazen na CAD model, aby došlo k vyrovnání výše zmíněnou metodou (Obr. 36). I v tomto případě proběhlo vyhodnocení barevné mapy odchylek (Obr. 37) a vyhodnocení pozice geometrických prvků (Obr. 38).



Obr. 36: Vyrovnání skenu na CAD model metodou středových bodů – autor



Obr. 37: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou středových bodů - autor



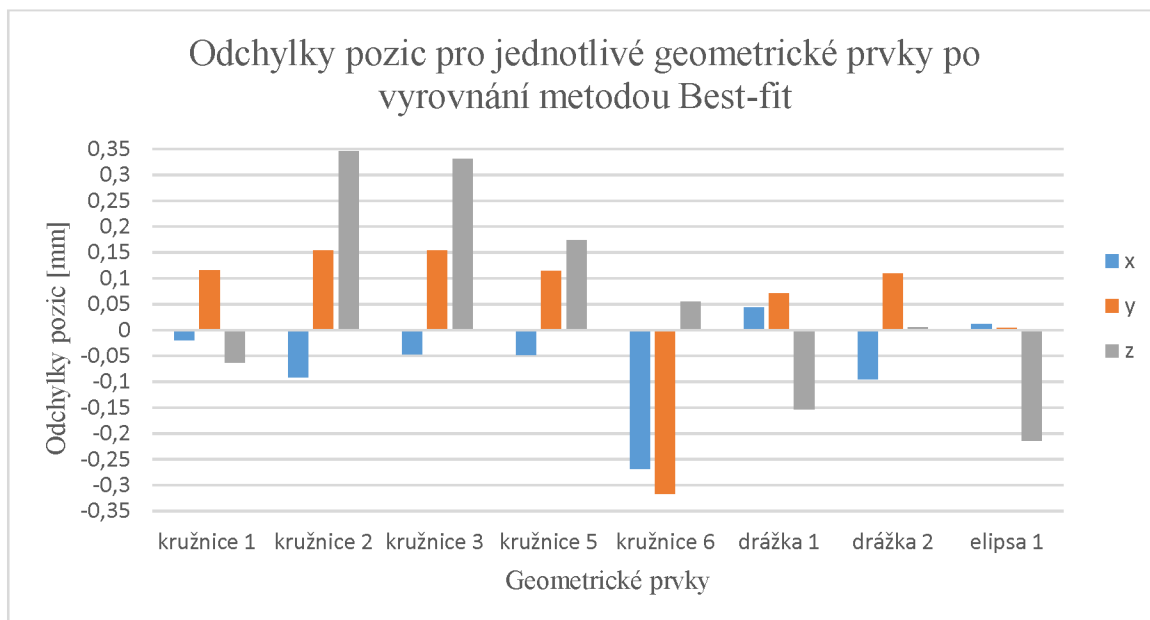
Obr. 38: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou středových bodů - autor

6.5 Výsledné srovnání jednotlivých metod

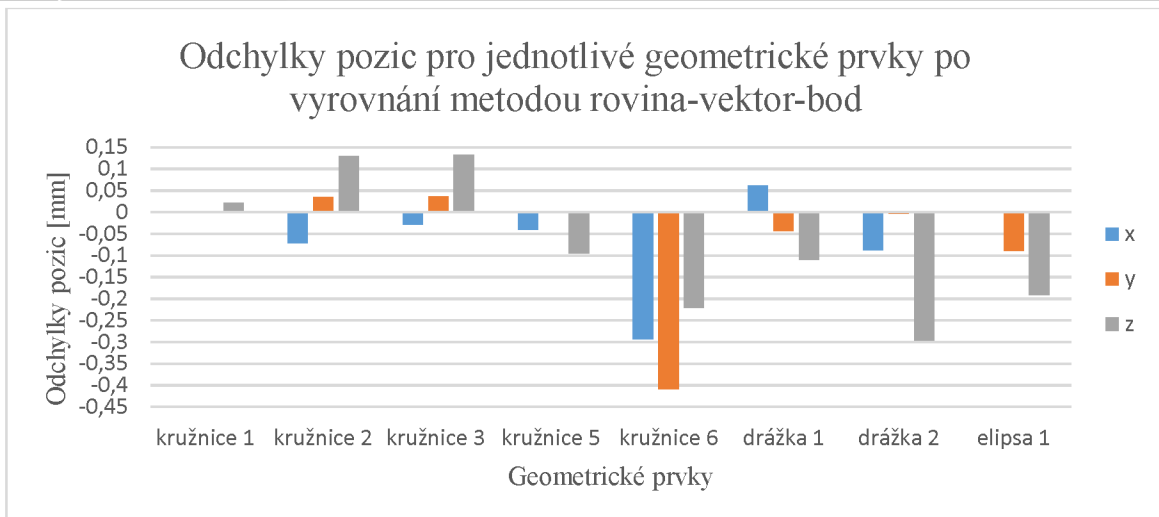
V tabulce 5 jsou znázorněny odchylky pozic pro jednotlivé geometrické prvky referenčního dílu v závislosti na jednotlivých metodách vyrovnání. Tyto metody vyrovnání však nemají vliv na odchylky v rozměrech daných geometrických prvků, ale pouze na odchylky v pozicích v souřadnicovém systému. Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků v jednotlivých metodách vyrovnání je znázorněno na níže uvedených obrázcích (Obr. 39, Obr. 40, Obr. 41, Obr. 42).

Tab. 5 Odchylky pozic pro jednotlivé geometrické prvky v závislosti na metodách vyrovnání

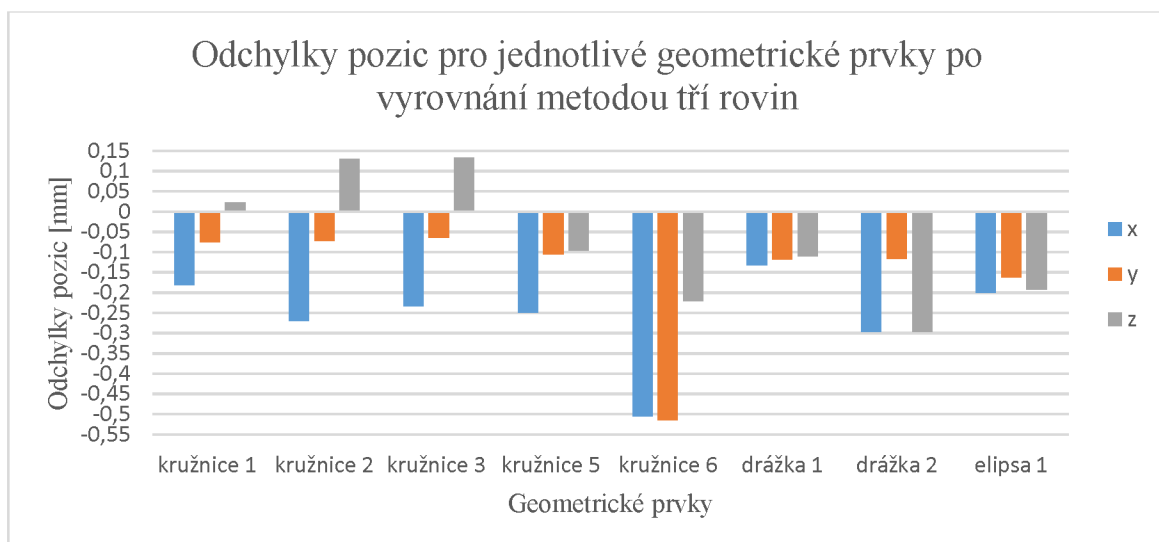
	kružnice 1			kružnice 2			kružnice 3			kružnice 5		
Osy	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Metoda Best-fit	-0,02	0,115	-0,063	-0,091	0,154	0,346	-0,047	0,154	0,331	-0,048	0,114	0,173
Metoda rovina-vektor-bod	0	0	0,022	-0,072	0,035	0,129	-0,029	0,036	0,133	-0,041	0,001	-0,096
Metoda tří rovin	-0,182	-0,076	0,022	-0,270	-0,073	0,129	-0,234	-0,064	0,133	-0,249	-0,106	-0,096
Metoda středových bodů	0,036	-0,02	0	-0,039	0,009	0	0,003	0,011	0	-0,012	-0,021	-0,254
	kružnice 6			drážka 1			drážka 2			elipsa 1		
Osy	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Metoda Best-fit	-0,269	-0,317	0,054	0,043	0,071	-0,153	-0,095	0,109	0,005	0,011	0,004	-0,214
Metoda rovina-vektor-bod	-0,293	-0,409	-0,221	0,061	-0,044	-0,110	-0,088	-0,004	-0,297	-0,002	-0,09	-0,192
Metoda tří rovin	-0,505	-0,515	-0,221	-0,133	-0,118	-0,11	-0,297	-0,117	-0,297	-0,201	-0,163	-0,192
Metoda středových bodů	-0,275	-0,419	-0,385	0,095	-0,064	-0,159	-0,06	-0,028	-0,465	0,021	-0,097	-0,252



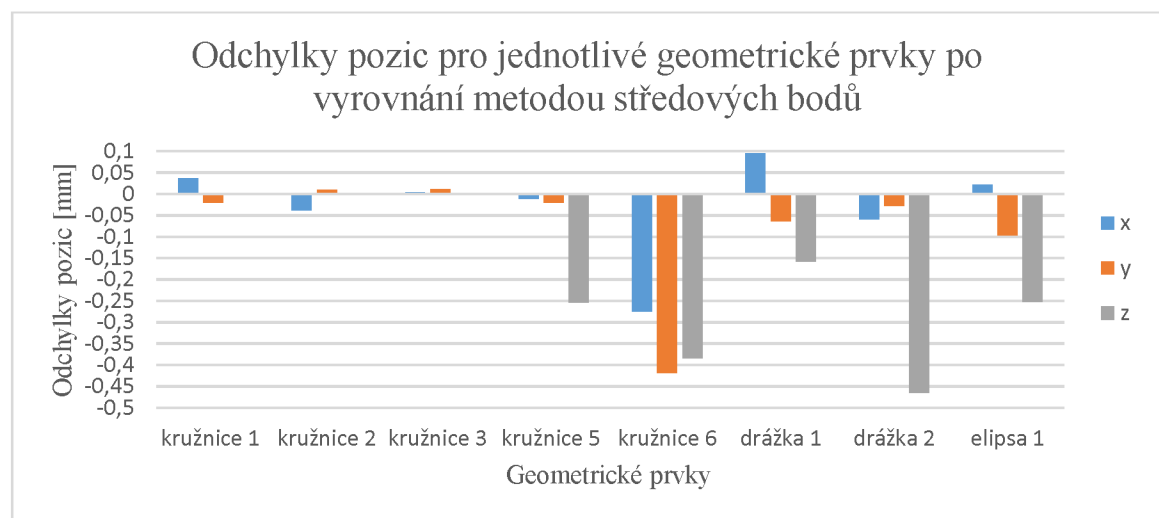
Obr. 39: Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou Best-fit - autor



Obr. 40: Grafické vyobrazení odchyłky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou rovina-vektor-bod -autor



Obr. 41: Grafické vyobrazení odchyłky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou tří rovin – autor



Obr. 42: Grafické vyobrazení odchyłky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou středových bodů - autor

6.6 Rozbor chyb

6.6.1 Metoda Best-fit

Vyrovnáním metodou Best-fit byly rozloženy chyby do celé plochy součásti. V barevné mapě odchylek se největší chyby projeví v místech s nejmenším poloměrem zaoblení (viz Obr. 28 – modrá barva). V ohledu na geometrické prvky je zřejmé z grafu (Obr. 39), že tato metoda vyrovnání nebyla zaměřena na žádný konkrétní prvek, proto jsou z grafu viditelné odchylky pozic ve větší nebo menší míře u každého z posuzovaných prvků a ve všech třech osách.

6.6.2 Metoda rovina-vektor-bod

Během vyrovnání metodou rovina-vektor-bod byly zaznamenány největší chyby v krajních oblastech barevné mapy odchylek, především v těch oblastech, které byly nejvíce vzdáleny od zvolené roviny, vektoru a bodu (viz Obr. 31). Z grafu (Obr. 40) je viditelné, že odchylky pozic jednotlivých geometrických prvků byly zjištěny téměř ve všech osách. Výjimkou byl pouze prvek kružnice 1, který byl při vyrovnání součástí zvoleného vektoru i bodu. Což je ve zmíněném grafu zřejmé podle nulových odchylek v osách X a Y.

6.6.3 Metoda tří rovin

Po vyrovnání metodou tří rovin byla zjištěna největší koncentrace chyb v barevné mapě odchylek (Obr. 34) na téměř totožných místech jako v případě použití metody rovina-vektor-bod, jenže v metodě rovina-vektor-bod to bylo příčinou vzdálenosti od volených prvků, načež při použití metody tří rovin to bylo způsobeno rozměry sekundární a terciární zvolené roviny, které byly malé v porovnání s celkovými rozměry součásti (viz Obr. 33). Co se týká odchylek pozic, tak podle grafu (Obr. 41) byly naměřeny odchylky ve všech osách a u všech posuzovaných geometrických prvků.

6.6.4 Metoda středových bodů

Vyrovnáním metodou středových bodů se projeví největší chyby na totožných místech barevné mapy odchylek, jako u metody rovina-vektor-bod (viz Obr. 37). Graf odchylek pozic jednotlivých prvků (Obr. 42) dokazuje, že především odchylky prvků, které byly pro vyrovnání použity, jsou téměř nulové. Naopak odchylky ostatních posuzovaných prvků byly naměřeny takřka totožné, jako například v metodě rovina-vektor-bod.

7 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Po prvním měření, z kterého byla vypracována studie měření, byla provedena následně další čtyři měření za účelem provedení statistického vyhodnocení měření a stanovení nejistoty měření u geometrických prvků, které byly použity pro některé metody vyrovnání (kružnice 1, kružnice 2, kružnice 3). Hodnoty jednotlivých měření jsou zaznamenány v tabulce 6.

Nejdříve bylo z každého měření provedeno spočítání aritmetického průměru hodnot rozměrů d_i pomocí vztahu [9]:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (7.1)$$

kde je:

\bar{d} aritmetický průměr měření

d_i i -tá hodnota měřené veličiny d

n celkový počet měření dané veličiny

i číslo měření

Poté byla stanovena standardní nejistota typu A zpracováním opakovaných měření. Standardní nejistota typu A byla vypočtena na základě vztahu [9]:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad (7.2)$$

Stanovení standardní nejistoty typu B, na rozdíl od předchozí nejistoty typu A, nezáviselo na počtu měření. Standardní nejistota typu B byla určena z ostatních možných zdrojů nejistot. V tomto případě se skládala standardní nejistota typu B z vlivu použitého etalonu, vlivu rozlišitelnosti měřidla, vlivu rozdílu teplot a vlivu odchylky teplot.

Vliv použitého etalonu byl zjištěn pomocí vztahu [9]:

$$l_s = \frac{a_1 + \left(\frac{b_1 \times D_1}{1000}\right)}{2} \quad (7.3)$$

kde je:

a_1 základní chyba systému

b_1 přírůstková chyba systému

D_1 nominální rozměr

Vliv rozlišitelnosti měřidla byl určen na základě vztahu [9]:

$$l_{ix} = \frac{RE}{\sqrt{3}} \quad (7.4)$$

kde je:

RE rozlišení měřidla

Ve výpočtu vlivu rozdílu teplot bylo využito předpokladu, že rozdíl teplot měřidla a součásti byl $\pm 2^\circ\text{C}$ a k následnému určení koeficientu citlivosti byl využit koeficient roztažnosti $11,5\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Vliv rozdílu teplot byl určen vztahem [9]:

$$l_t = \frac{(t_1 - t_2)}{\sqrt{3}} \quad (7.5)$$

kde je:

$(t_1 - t_2)$ rozdíl teplot měřidla a součásti

Koeficient citlivosti u vlivu rozdílu teplot byl stanoven vztahem [9]:

$$c_{j1} = \frac{D_1 \times \alpha}{1000} \quad (7.6)$$

kde je:

α koeficient roztažnosti

V určení vlivu odchylky teplot, pro kterou byl následně určen i koeficient citlivosti, bylo využito opět předpokladu, že rozdíl koeficientů roztažnosti měřidla a součásti byl $\pm 2\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Vliv odchylky teplot byl popsán vztahem [9]:

$$l_\alpha = \frac{(t - 20)}{\sqrt{3}} \times \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{3}} \quad (7.7)$$

kde je:

t teplota prostředí

$(\alpha_1 - \alpha_2)$ rozdíl koeficientů roztažnosti měřidla a součásti

Koeficient citlivosti vlivu odchylky teplot byl dán vztahem [9]:

$$c_{j2} = \frac{D_1}{1000} \quad (7.8)$$

Výsledné stanovení standardní nejistoty typu bylo stanoveno podle vztahu [9]:

$$u_B = \sqrt{l_s^2 + l_{ix}^2 + (l_t \times c_{j1})^2 + (l_\alpha \times c_{j2})^2} \quad (7.9)$$

Kombinovaná standardní nejistota byla stanovena geometrickým součtem nejistoty typu A a typu B [9]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.10)$$

Následně byla stanovena celková rozšířená nejistota. Celková rozšířená nejistota poskytuje interval, který zahrnuje značný počet distribuce hodnot, které se přisuzují stanovené veličině jako skutečná hodnota této veličiny. Výpočet celkové rozšířené nejistoty byl proveden na základě vztahu [9]:

$$U = k \times u_C \quad (7.11)$$

kde je:

k koeficient

Koeficient k obecně závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výstupní veličiny v modelu měření a na zvolené pravděpodobnosti pokrytí. V tomto případě byl zvolen koeficient $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95,45%.

Konečný výsledek byl zapsán v následujícím vztahu [9]:

$$D = \bar{d} \pm U \quad (7.12)$$

Veškeré údaje, které byly k výpočtům použity, jsou uvedeny v tabulce 7.

V tabulce 8 jsou uvedeny všechny výsledky výpočtů, které byly nutné ke statistickému vyhodnocení měření a ke stanovení nejistoty měření.

Tab. 6 Hodnoty jednotlivých měření

Číslo měření	Jednotky	kružnice 1	kružnice 2	kružnice 3
1	[mm]	10,247	10,154	10,306
2	[mm]	10,254	10,161	10,300
3	[mm]	10,223	10,148	10,309
4	[mm]	10,241	10,150	10,301
5	[mm]	10,238	10,152	10,304

Tab. 7 Potřebné údaje o měření [9]

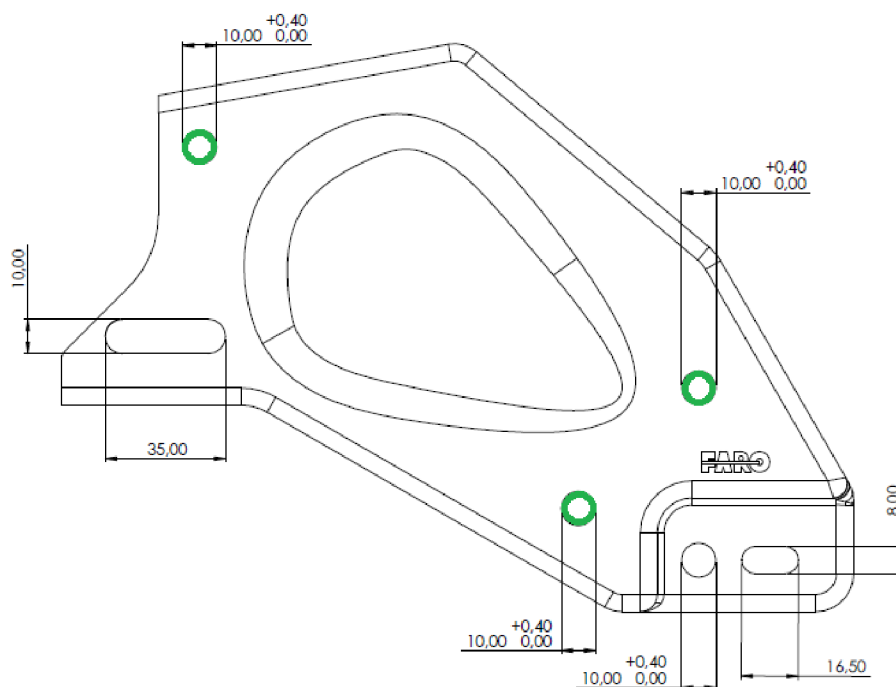
Údaje o měření	Veličiny	Jednotky	kružnice 1	kružnice 2	kružnice 3
Nominální rozměr	D_1	[mm]	10,000	10,000	10,000
Základní chyba systému	a_1	[μm]	48	48	48
Přírůstková chyba systému	b_1	[μm]	0	0	0
Koeficient roztažnosti	α	[$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	11,5	11,5	11,5
Rozdíl koeficientů roztažnosti měřidla a součásti	$\alpha_1 - \alpha_2$	[$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	2	2	2
Rozdíl teplot měřidla a součásti	$t_1 - t_2$	[$^\circ\text{C}$]	2	2	2
Rozlišení měřidla	RE	[μm]	1	1	1
Koeficient	k	[-]	2	2	2
Teplota prostředí	t	[$^\circ\text{C}$]	22	22	22

Tab. 8 Výpočty statistického vyhodnocení měření a stanovení nejistoty měření

Výpočty	Veličiny	Jednotky	kružnice 1	kružnice 2	kružnice 3
Aritmetický průměr	\bar{d}	[mm]	10,241	10,153	10,304
Nejistota typu A	u_A	[μm]	7,255729	3,130495	2,300435
Vliv použitého etalonu-nejistota měření koncových měrek	l_s	[μm]	24,00	24,00	24,00
Vliv rozlišitelnosti měřidla	l_{ix}	[μm]	0,577350	0,577350	0,577350
Vliv rozdílu teplot	l_t	[μm]	1,154701	1,154701	1,154701
Koeficient citlivosti vlivu rozdílu teplot	c_{j1}	[-]	0,115	0,115	0,115
Vliv odchylky teplot	l_α	[μm]	1,333333	1,333333	1,333333
Koeficient citlivosti vlivu odchylky teplot	c_{j2}	[-]	0,01	0,01	0,01
Výsledná standardní nejistota typu B	u_B	[μm]	24,0074	24,0074	24,0074
Kombinovaná standardní nejistota	u_C	[μm]	25,079	24,211	24,117
Celková rozšířená nejistota	U	[μm]	50,158	48,422	48,234
Konečný výsledek	D	[mm]	10,241 \pm 0,05	10,153 \pm 0,048	10,304 \pm 0,048

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 43) je znázorněn výřez z výkresu referenčního dílu, na kterém jsou barevně zvýrazněny geometrické prvky dílu, které byly zvoleny pro statistické vyhodnocení a stanovení nejistoty měření. Tyto geometrické prvky byly jako jediné prvky referenčního dílu, které měly tolerované rozměry, proto nejenomže patřily mezi prvky využívané k některým z metod vyrovnání, ale také byly právě kvůli tomu zvoleny ke statistickému vyhodnocení měření a ke stanovení nejistoty měření.

Na základě těchto měření byly stanoveny konečné výsledky měřených rozměrů. U kružnice 1 byl zjištěn konečný průměr $D=10,241\pm 0,05\text{mm}$, u kružnice 2 byl určen průměr $D=10,153\pm 0,048\text{mm}$ a u kružnice 3 byl vyhodnocen konečný průměr $D=10,304\pm 0,048\text{mm}$. Na základě těchto výsledků byly tolerované rozměry měřených geometrických prvků označeny za vyhovující.



Obr. 43: Výřez z výkresu referenčního dílu – autor

8 ZÁVĚR

Správná volba metody vyrovnání má zásadní vliv na výsledek měření. Neméně důležitá je také volba správných prvků, pomocí kterých bude vyrovnání provedeno. Jak bylo uvedeno v kapitole 5, nevhodná metodika vyrovnání a špatný výběr prvků patří k nejčastějším vadám, které mohou při měření vzniknout. V praxi se proto dbá v maximální míře na to, aby metodu vyrovnání včetně konkrétních prvků vždy definoval konstruktér již na výkresové dokumentaci. V případě, že však měřená součást nedisponuje těmito údaji, jako nejvhodnější metoda vyrovnání se nabízí metoda Best-fit (viz kapitola 4.1). V praxi se tato metoda zároveň využívá nejčastěji, a to především kvůli univerzálnosti ve smyslu, že ji lze uplatnit na většinu měřených součástí.

Ke studii měření byl zvolen referenční díl, který byl vyroben vypalováním ocelového plechu a následně byl díl tvářen. Součástí dílu byly i geometrické prvky, jejichž rozměry byly tolerovány, proto bylo nutné, aby tyto prvky byly následně obrobeny. Po měření byl vyhotoven sken referenčního dílu, který byl následně čtyřmi metodami vyrovnán na CAD model.

Ze všech metod vyrovnání, které byly použity, byla vyhodnocena jako nejvhodnější metoda středových bodů. Jako nejvhodnější metoda vyrovnání byla vyhodnocena především na základě faktu, že byla vyrovnána pomocí tolerovaných geometrických prvků. Během vyrovnání metodou středových bodů, a zejména při volbě prvků k vyrovnání, bylo využito předpokladu, že tolerované rozměry prvků jsou důležité v ohledu funkčnosti referenčního dílu. V případě, že by došlo k měření a následnému vyrovnání ještě před obrobením tolerovaných geometrických prvků, jako nejvhodnější metoda vyrovnání by se v tom případě jevila metoda Best-fit. Touto metodou vyrovnání by došlo k rozložení chyby měření do celé plochy dílu, což by bylo ideální v případě, že by neexistoval žádný předpoklad ohledně funkčnosti referenčního dílu.

K prvnímu měření se následně přidala ještě další čtyři měření, která již zahrnovala pouze měření rozměrů geometrických prvků použitých k vyrovnání u většiny metod. Jednalo se o geometrické prvky kružnice 1, kružnice 2 a kružnice 3. Výsledky statistického vyhodnocení měření a stanovení nejistoty měření prokázaly, že rozměry posuzovaných prvků byly vyhovující.

Celé měření bylo zhodnoceno jako úspěšné. Nejenže rozměry tolerovaných geometrických prvků byly označeny jako vyhovující, ale i metoda, která byla na začátku předpokládána, jako nejvhodnější, se po studii měření i jako nejvhodnější ukázala, a to především v porovnání s ostatními metodami. Pro úspěšné vyrovnání bylo stěžejní, že byly známy alespoň minimální technické informace ohledně referenčního dílu, na jejichž základě bylo možné vytvořit předpoklad o tom, jaké metody vůbec do studie zahrnout.

Při provádění dalšího obdobného měření by bylo určitě přínosné, pokud by byly známy kompletní technické informace ohledně součásti, která by byla podrobena měření. Především informace typu, které části dílu jsou zásadní pro jeho samotnou funkčnost, které rozměry jsou tolerovány nebo které z těchto informací jsou pro díl prioritní. Takové informace, jak už bylo zmíněno, totiž dokážou do značné míry ovlivnit výslednou správnost měření. Všechny stanovené cíle závěrečné práce byly splněny.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- [2] PRIMA BILAVČÍK, S.R.O. *Přístroje pro měření a metrologii*. Uherský Brod: ELTISK, 2019.
- [3] PRIMA BILAVČÍK, S.R.O. *PolyWorks|Inspector: Essentials*. Uherský Brod: ELTISK, 2016.
- [4] Oficiální firemní stránky FARO Technologies Inc., Dostupné z:
<https://www.faro.com/products/3d-manufacturing/faro-laser-tracker/>
- [5] Technický list k přístroji FARO Arm Quantum S poskytnutý firmou PRIMA BILAVČÍK, s.r.o.
- [6] Oficiální firemní stránky PRIMA BILAVČÍK, s.r.o., Dostupné z:
<https://www.merici-pristroje.cz/>
- [7] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV Statistika a pravděpodobnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [8] ČSN EN ISO 10360-2:2002. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů (ISO 10360-2:2001)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 35 s. Třídící znak 252011.
- [9] EA 4/02:2013. *Vyjádřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2))*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.
- [10] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s. Třídící znak 83031.

10 SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratk a veličin

%: procenta

\bar{d} : aritmetický průměr z naměřených hodnot

d_i : i -tá hodnota měřené veličiny d

“: palec

°C: stupeň Celsia

μm: mikrometr

a_1 : základní chyba systému

b_1 : přírůstková chyba systému

c_{j1} : koeficient citlivosti vlivu rozdílu teplot

c_{j2} : koeficient citlivosti vlivu odchylky teplot

CMM: Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj

CNC: Computer Numerical Control – číslicové řízení počítačem

D : konečný výsledek

D_I : nominální rozměr

i : číslo měření

IP: Ingress Protection – ochrana proti vniknutí

k : koeficient

kPa: kilopascal

l_{ix} : vliv rozlišitelnosti měřidla

l_s : vliv použitého etalonu-nejistota měření koncových měrek

l_t : vliv rozdílu teplot

l_a : vliv odchylky teplot

m: metr

m°C: stupeň Celsia⁻³

mm: milimetr

n : celkový počet měření dané veličiny

N: newton

RE : rozlišení měřidla

SMR: Spherically Mounted Retro – kulový odražeč

t_I : teplota měřidla

t_2 : teplota součásti

U : celková rozšířená nejistota

u_A : nejistota typu A

u_B : nejistota typu B

u_C : kombinovaná standardní nejistota

WLAN: Wireless Local Area Network – bezdrátová lokální síť

α : koeficient roztažnosti

α_1 : koeficient roztažnosti měřidla

α_2 : koeficient roztažnosti součásti

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1: Popis hlavních částí portálového souřadnicového	14
Obr. 2: Znázornění uspořádání Kartézské souřadné soustavy portálového CMM - autor	15
Obr. 3: Mostový souřadnicový měřicí přístroj COORD3 MCT NT [2]	15
Obr. 4: Horizontální souřadnicový měřicí stroj COORD3 SWAN SI [2]	16
Obr. 5: Mobilní souřadnicový měřicí stroj FaroArm Quantum M [2].....	17
Obr. 6: Výřez z tabulky znázorňující závislost přesnosti měření na poloměru měřicího rozsahu a typu provedení [2].....	17
Obr. 7: Popis hlavních součástí mobilního souřadnicového měřicího přístroje FARO Quantum [2]	18
Obr. 8: Mobilní souřadnicový měřicí stroj FaroArm s laserovým liniovým skenerem [2]	19
Obr. 9: Popis hlavních součástí na přístroji Laser Tracker FARO Vantage [4]	20
Obr. 10: Vliv tvaru dotykového prvku při měření zakřivených povrchů [1]	21
Obr. 11: Vliv počtu a polohy dotykových bodů na výsledek měření na objektu s odchylkou tvaru [1]	21
Obr. 12: Spínací dotykové senzory: princip s mechanickými kontakty (vlevo), princip s dotykově elektrickým měničem (vpravo) [1]	22
Obr. 13: Skenovací dotykový senzor: skenovací senzory ve směru X, Y a Z. [1]	23
Obr. 14: Princip laterálně měřicího senzoru s optickým zobrazením objektu [1]	24
Obr. 15: Metoda vyrovnání Best-fit - autor	25
Obr. 16: Metoda vyrovnání pomocí tří rovin - autor	26
Obr. 17: Metoda vyrovnání pomocí roviny, vektoru a bodu - autor	26
Obr. 18: Metoda vyrovnání pomocí středových [3].....	27
Obr. 19: Referenční cílové body [3]	27
Obr. 20: Referenční cílové čáry [3].....	28
Obr. 21: Správně zvolena metoda vyrovnání [6]	28
Obr. 22: Špatně zvolena metoda vyrovnání [6]	28
Obr. 23: Správně vybrané prvky k vyrovnání - autor	29
Obr. 24: Špatně vybrané prvky k vyrovnání – autor	29
Obr. 25: Sken referenčního dílu – autor	30
Obr. 26: CAD model referenčního dílu - autor	30
Obr. 27: Vyrovnání skenu na CAD model metodou Best-fit - autor	31

Obr. 28: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou Best-fit - autor	32
Obr. 29: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou Best-fit – autor.....	32
Obr. 30: Vyrovnání skenu na CAD model metodou rovina-vektor-bod - autor	33
Obr. 31: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou rovina-vektor-bod - autor	34
Obr. 32: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou rovina-vektor-bod – autor	34
Obr. 33: Vyrovnání skenu na CAD model metodou tří rovin – autor.....	35
Obr. 34: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou tří rovin - autor	36
Obr. 35: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou tří rovin - autor.....	36
Obr. 36: Vyrovnání skenu na CAD model metodou středových bodů – autor	37
Obr. 37: Vyhodnocení barevné mapy odchylek při vyrovnání metodou středových bodů - autor	38
Obr. 38: Vyhodnocení pozice geometrických prvků po vyrovnání metodou středových bodů - autor	38
Obr. 39: Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou Best-fit - autor	39
Obr. 40: Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou rovina-vektor-bod -autor	40
Obr. 41: Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou tří rovin – autor.....	40
Obr. 42: Grafické vyobrazení odchylky pozic geometrických prvků při vyrovnání metodou středových bodů - autor.....	40
Obr. 43: Výřez z výkresu referenčního dílu – autor.....	46

10.3 Seznam tabulek

Tab. 1 Řešení portálového souřadnicového měřicího stroje	14
Tab. 2 Označení strojních součástí dle obrázku (Obr.1)	14
Tab. 3 Označení strojních součástí dle výše uvedeného obrázku (Obr.7).....	18
Tab. 4 Označení strojních součástí dle výše uvedeného obrázku (Obr.9).....	20
Tab. 5 Odchylky pozic pro jednotlivé geometrické prvky v závislosti na metodách vyrovnání.....	39
Tab. 6 Hodnoty jednotlivých měření	44
Tab. 7 Potřebné údaje o měření [9]	45
Tab. 8 Výpočty statistického vyhodnocení měření a stanovení nejistoty měření	45