

Měření přesnosti dutiny formy

Libor Kučera

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Libor KUČERA**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření přesnosti dutiny formy**

Zásady pro vypracování:

1. Vytýčení koncepce práce.
2. Studium odborné literatury.
3. Zpracování teoretické části práce.
4. Zpracování praktické části práce.
5. Závěr.

Rozsah práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Christoph R. a Neumann H. J. : Multisenzorová souřadnicová měřicí technika
Pernikář J. : Strojírenská metrologie
Pokorný P. : Souřadnicové měřicí stroje

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2010**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2010**

Ve Zlíně dne 15. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

Příjmení a jméno: Kučera Libor

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 2. 6. 2010


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosažených v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělků dosažených školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je popsat měřicí souřadnicovou techniku a provést praktické měření. Práce je rozdělena do několika částí. Teoretická část se zabývá principem měření, přehledem a vybavením měřicí souřadnicové techniky. V praktické části jsou popsány stávající technologie zaměření segmentů a provedena měření přesnosti dutiny formy pomocí optického senzoru, jeho porovnání s 3D CAD modelem a statistickým vyhodnocením měření.

Klíčová slova: souřadnicové měřicí stroje, měřicí senzory

ABSTRACT

Purpose of this bachelor work is to describe measuring coordinate engineering and perform practical measurement. This work is divided into several parts.

Theoretical part is dealing with measurement principle and summary of measuring coordinate device.

In practical part there are described a present technology of focusing separated segments and performed measuring mold cavity accuracy by using optical sensor, its comparison to 3D CAD model and statistic evaluation of measurement.

Keywords: Measuring coordinate machines, measuring sensors

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za vedení při práci. Dále děkuji panu Rostislavu Kadlčikovi z firmy PRIMA Bilavčík s.r.o. za odborné konzultace a Ing. Jiřímu Kratochvílovi z firmy Barum Continental spol. s r.o. za technickou pomoc. Děkuji také celé své rodině za jejich podporu při studiu.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná ve IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 2. 6. 2010

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
TEORETICKÁ ČÁST	9
1 MĚŘÍCI TECHNIKA	10
1.1 ÚVOD DO MĚŘÍCI TECHNIKY.....	10
1.2 KARTÉZSKÝ SYSTÉM SOUŘADNIC.....	10
1.3 PRINCIP A PŘESNOST MĚŘENÍ	11
1.4 MĚŘÍCI MIKROSKOPY, PROFILPROJEKTORY A PROJEKTORY.....	12
1.4.1 Princip měření měřících mikroskopů a profilprojektorů	13
2 SOUŘADNICOVÁ MĚŘÍCI TECHNIKA	14
2.1 SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCI STROJE	14
2.1.1 Typy konstrukcí souřadnicového měřicí stroje	14
2.1.2 Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem	15
2.1.3 Souřadnicové měřicí stroje s portálem	16
2.1.4 Konstrukce souřadnicového měřicího stroje.....	17
2.2 SENZORY PRO SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCI STROJE.....	19
2.2.1 Dotykové senzory	20
2.2.1.1 Spínací dotykové senzory	20
2.2.1.2 Měřicí dotykové senzory.....	20
2.2.1.3 Měřicí dotykově optické senzory	22
2.2.1.4 Dotykově optické měřicí senzory.....	23
2.2.2 Vizualní senzory.....	24
2.2.2.1 Hranový senzor.....	24
2.2.2.2 Senzor zpracování obrazu	24
2.2.2.3 Zoomovací objektivy	25
2.2.2.4 Osvětlení pro vizualní senzory	26
2.2.3 Senzory měřící vzdálenost	27
2.2.3.1 Autofokus.....	27
2.2.3.2 Laserové bodové senzory.....	28
2.2.3.3 Vícerozměrné laserové senzory na měření vzdálenosti.....	29
2.2.4 Počítačová tomografie	30
2.2.4.1 Princip počítačové tomografie	30
2.2.5 Multisenzorová technika	31
2.3 PŘESNOST MĚŘENÍ.....	32
2.3.1 Specifikace a vstupní kontrola	33
2.3.2 Nejistota měření	34
2.3.3 Vhodnost měřicího procesu	35
2.4 SOFTWARE STROJŮ	36
2.5 STATISTICKÉ VELIČINY PRO PRAKTICKOU ČÁST	37
PRAKTICKÁ ČÁST	37
3 CHARAKTERISTIKA SPOLEČNOSTI A PRODUKTU	38
3.1 BARUM CONTINENTAL SPOL. S R.O. DIVIZE VÝROBY FOREM.....	38
3.1.1 Konstrukce forem a výroba.....	39

3.2	RUČNÍ ZAMĚŘENÍ SEGMENTŮ	41
3.3	STROJNÍ ZAMĚŘENÍ SEGMENTŮ	42
3.4	MULTISENZOROVÝ SOUŘADNICOVÝ MĚŘICÍ STROJ WERTH	45
3.5	CNC FRÉZKA FIDIA G966.....	46
4	MĚŘENÍ PŘESNOSTI DUTINY FORMY	49
4.1	SPECIFIKACE MĚŘENÉHO TVARU	49
4.2	ZPŮSOB MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍHO SEGMENTU.....	50
4.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	56
4.4	CENOVÁ KALKULACE MĚŘICÍHO STROJE WERTH SCOPE-CHECK MB 3D	56
	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	60
	SEZNAM TABULEK	61
	SEZNAM GRAFŮ.....	62

ÚVOD

Univerzální průmyslové měřicí přístroje se začaly výrazně rozvíjet od vynálezu projekčního mikroskopu. Princip funkce filmprojektoru se od jeho vynálezu a sériové výroby (filmprojektor Werth-RECORD 1954) prakticky nezměnil a do nedávna tato optická bezdotyková metoda převládala na poli univerzálních měřicích přístrojů. Automatické měření pomocí měřicích projektorů a měřicích mikroskopů bylo možné pouze u dvojrozměrných dílců metodou procházejícího světla. Tato metoda se výrazně prosadila hlavně díky své všestrannosti. Základní nevýhodou však bylo to, že obsluha přímo ovlivňovala výsledek měření tím, jak přesně zaměřila daný bod. Opakovatelnost této metody nebyla o chybě měření, ale i o pečlivosti obsluhy měřicího stroje.

V dnešní době se díky výraznému pokroku v oblasti výpočetní techniky, optických snímačů, laserů a dalších dostávají do popředí další technologie pro bezdotykové měření. Mezi hlavní obory využívající měřicí a skenovací přístroje patří reverzní inženýrství, které požaduje co nejpřesnější, nejuniverzálnější měřicí přístroje a klasické měření pro kontrolu rozměrů součástek ve výrobním procesu. S nárůstem výkonu výpočetní techniky se začaly také hojně rozvíjet i další odlišné odvětví. Souřadnicové měřicí stroje představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření ve strojírenství. Současný design výrobků a nutnost šetřit materiálem ať už důvodu ceny materiálu anebo úspory hmotnosti nutí špičkové strojírenské obory jako automobilový a letecký průmysl k vytváření čím dál tím více tvarově složitějších výrobků. Tyto výrobky jsou většinou vyrobitelné pouze na CNC strojích a kontrolovatelné na souřadnicových strojích.

Tato práce se bude v teoretické části zabývat přehledem a vybavením souřadnicových měřicích strojů. V praktické části bakalářské práce se pak budeme zabývat skenování dutiny formy pomocí optické sondy Werth Zoom na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji firmy Werth.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

1.1 Úvod do měřicí techniky

Ještě před několika málo lety převládala optická, tzn. bezdotyková dimenzionální měřicí technika měřících mikroskopů a měřících projektorů, jejichž základní princip zůstal nezměněn od vzniku profilprojektoru. Automatické měření geometrických prvků bylo možné pouze u dvourozměrných dílců metodou využívající procházející světlo. Z důvodu své všestrannosti nahradila souřadnicová měřicí technika různé jednoúčelové měřicí stroje k měření průmyslově vyráběných dílců a dosáhla vysokého významu. Předpokladem pro moderní optickou souřadnicovou měřicí techniku jsou metody zpracování obrazu a laserové senzory, které byly vyvinuty teprve v průběhu minulého desetiletí. Tak zvané multisenzorový souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny jak dotykovými, tak i optoelektronickými senzory a spojují dotykové a optické měření. Teprve tato kombinace umožňuje zvládnout většinu úkolů, které jsou na ně kladeny při měření ve všech průmyslových odvětvích. Optoelektronické senzory získávají na významu zvláště kvůli vzrůstající komplexnosti měřených tvarů a velikosti dílců a díky rostoucí miniaturizaci měřených výrobků. Vysoká rychlost měření multisenzorových souřadnicových měřících strojů dovoluje hospodárné měření ve výrobě. [1]

Mnohostranné senzory otevírají sice uživateli četné nové možnosti použití, vyžadují však hluboké vědomosti v oblasti geometrie, matematiky a fyziky. Velice důležitá je prostorová představivost a logika myšlení. Taktéž je důležité znát limity multisenzorového měřícího zařízení a jeho bezchybné ovládání.

1.2 Kartézský systém souřadnic

Většina moderních měřících přístrojů se dá označit jako souřadnicové systémy. Tyto souřadnicové měřicí přístroje většinou používají pro určení bodu v prostoru kartézské souřadnice. Prostor v kartézských souřadnicích je popsán třemi navzájem kolmými osami X, Y, Z. Rozlišujeme pravotočivou a levotočivou prostorovou soustavu kartézských souřadnic. Pravotočivou si můžeme představit tak, že stojíme v počátku souřadnic. Osa X pak směřuje přímo před nás ve směru pohledu, osa Y pak směřuje vlevo od nás a osa Z směřuje nahoru. V kartézských souřadnicích určíme polohu bodu jako vzdálenost bodu od počátku na jed-

notlivých osách. Většinou všechny osy používají stejné měřítko. Pro zobrazení jednotlivých tvarů potřebujeme v prostoru také reprezentovat základní geometrické útvary jako je rovina a přímka. Přímku v prostoru kartézských souřadnic znázorníme dvojicí bodů ležících na přímce, nebo také jedním bodem a vektorem směru přímky. Vektor směru určíme jako rozdíl souřadnic dvou bodů ležících na přímce. Rovinu v kartézských souřadnicích můžeme definovat pomocí tří bodů, pomocí přímky a bodu, nebo také pomocí bodu a dvou na sebe kolmých vektorů. [1]

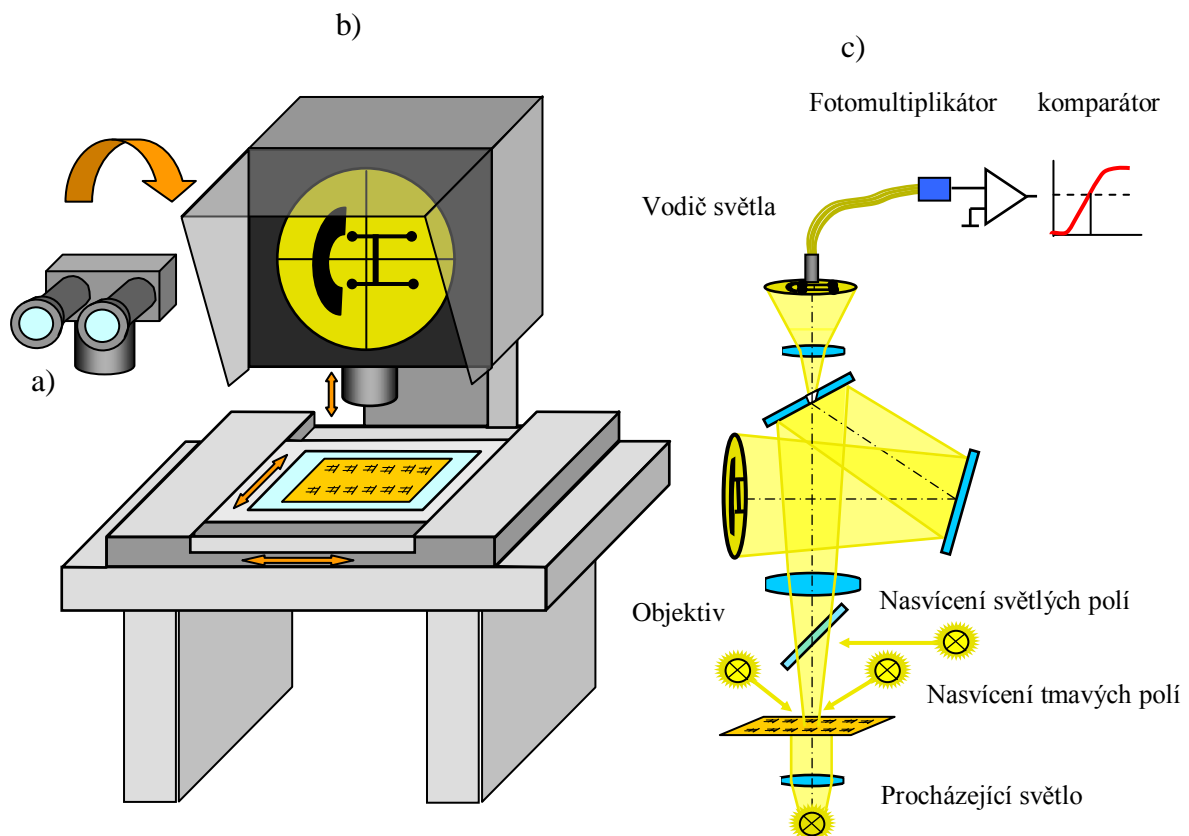
1.3 Princip a přesnost měření

Souřadnicové měřicí stroje slouží k měření geometrických prvků dílců, jako je délka, průměr, úhel, sklon a rovnoběžnost. V principu se redukuje více nebo méně komplexní stanovení rozměrů, tvarů a polohy na zjišťování a matematické vyhodnocení prostorových souřadnic jednotlivých bodů. Výsledky měření se dají znázornit graficky a v tabulce. Téměř všechna provedení strojů mají za základ kartézsky uspořádané souřadnicové osy s lineárním odměřováním. Měřicí suport se v osách pohybuje buď ručně, nebo pomocí motoru. Na jedné z os, většinou svislé ose Z (pinola), je umístěn senzor k snímání měřených bodů. V případě dotykového senzoru se u každého dotyku snímače s měřeným dílcem načtou polohy tří měřících suportů, z nich se zjistí souřadnice bodu na povrchu měřeného dílce v osách X, Y, Z. Některé optoelektronické senzory, jako například senzory zpracování obrazu, mají vlastní, většinou dvourozměrnou oblast měření. S takovými senzory je možné současně měřit více bodů jednoho geometrického prvku objektu bez pohybu v souřadných osách. Také je možné tímto způsobem najednou zachytit menší geometrické prvky objektů. Označuje se to jako „měření v obraze“. Pokud se měřicí senzor naproti tomu pohybuje mezi dvěma měřeními na jednom rozšířeném geometrickém prvku objektu, mluví se o „měření na obraze“. V obou případech dochází k překrytí souřadnicové soustavy senzoru a souřadnicové soustavy stroje. [1]

Obvykle se vzhledem k požadované přesnosti užívá přímé odměřování. Může být analogové nebo číslicové. Odměřovací systém podstatně ovlivňuje přesnost měření souřadnicového měřicího stroje. Rozlišovací schopnost a periodická chyba měřítka ovlivňují výsledek měření v závislosti na měřené délce. [2]

Vypracování komplexních měřících programů je ale velmi náročné a nepřehledné.

Výhoda měření pomocí mikroskopů a projektorů je v nenáročnosti na čistotu okolního prostředí a velikosti měřícího zařízení. Díky těmto vlastnostem může být měřící zařízení i mobilní. Tato vlastnost výrazně zvyšuje rychlost měření a zpětnou vazbu na pracovní proces. Ne vždy je totiž možné vybudovat měřící stanoviště vedle a u každé obráběcí operace.



Obrázek 2 Princip konstrukce měřícího mikroskopu a měřícího projektoru s hranovým senzorem Werth a) měřící mikroskop, b) měřící projektor, c) hranový senzor Werth a dráha paprsků v projektoru [1]

1.4.1 Princip měření měřících mikroskopů a profilprojektorů

U profilprojektorů promítá optika obraz měřeného objektu v určené měřítku na matnici obrazovky. Pomocí průhledného kontrolního výkresu, který je rovněž v určeném měřítku, se může uskutečnit přímé porovnání zobrazené oblasti dílce s rozměry na výkrese. Tento postup můžeme označit jako předchůdce „měření v obraze“. Například se výstupní obraz na profilprojektoru nastavil na konstantní zvětšení 1:10 (výsledný obraz promítnutý na obrazovku projektoru je zvětšen 10x). Jednoduchých přiložením výkresu měřeného dílce

zvětšeného 10x a vytisklého na pauzovacím papíře zjistíme případné odchylky ve tvaru a rozměrech. Po zjištění případných odchylek je nutné dílec následně přeměřit ručními měřidly nebo souřadnicovým strojem.

Výhodou je rychlá kontrola několika geometrických prvků při nejjednodušší obsluze. V podstatě je však možná pouze výpověď dobré – špatné. Obsluha výrazně ovlivňuje výsledek měření. Abychom dosáhly přijatelné nejistoty měření, musí mít optika mimořádně nízké zkreslení.

Měřicí projektor spojuje výhody měřicího mikroskopu a profilprojektoru a eliminuje jejich hlavní nevýhodu. Na matnici obrazovky se může uskutečnit porovnání s výkresem stejně rychle jako u profilprojektoru. Měřicí projektor má také na svých osách odměřování a elektrický pohon posuvů os. (u profilprojektoru je posuv os řešen manuálně).

Snímání jednotlivých bodů se může provádět nitkovým křížem podobně jako měřícím mikroskopem. V 70. letech vyvinul Dr. Siegfried Werth tak zvaný „hranový senzor“, první optoelektronický senzor pro měřicí projektory, který dovoluje automatické snímání bodů objektu. Uvedený „hranový senzor“ přebírá úkol lidského oka (automatické zaostření na hranu měřeného objektu) pro kontrastní objekty. Ve spojení s CNC řízením umožnilo toto vybavení senzory poprvé v roce 1980 automatizovat optické souřadnicové měřicí stroje. Nejistota měření tehdejších přístrojů se pohybovala v rozsahu jednotek mikrometrů, v současné době je měření ještě o řád přesnější. [1]

2 SOUŘADNICOVÁ MĚŘÍCI TECHNIKA

2.1 Souřadnicové měřicí stroje

2.1.1 Typy konstrukcí souřadnicového měřicí stroje

Souřadnicový měřicí stroj kontroluje výrobky podobným způsobem, kterým CNC stroj vyrábí. Pracuje rychle a efektivně při zhruba 80% úspoře času. Konstrukce souřadnicových měřicích strojů byla vynucena potřebou měření karosérií v automobilovém a leteckém průmyslu a potřebou měření u CNC strojů ve strojírenské výrobě.

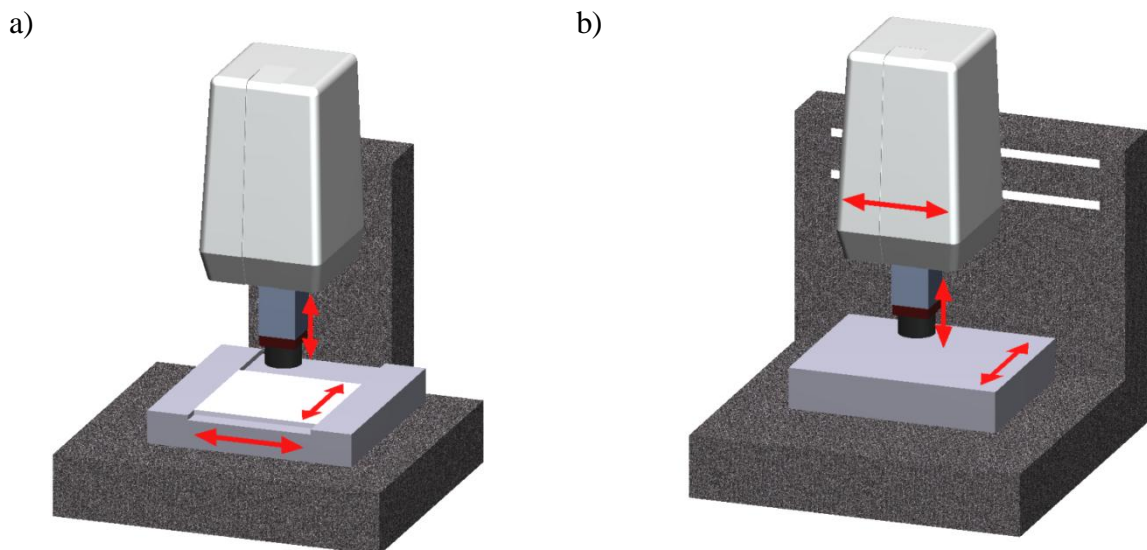
Souřadnicový měřicí stroj je zařízení, které má svoji vlastní přiměrnou desku doplněnou měřicím mechanismem. Měřicí mechanismus je vždy vybaven měřicím dotekem,

kterým se měřená součást změří. Poloha součástky je identifikována a zobrazena na číselném ukazateli hodnot a je vyjádřena v kartézském systému souřadnic.

Souřadnicových měřících strojů je více druhů a mohou být uspořádány podle potřeby do skupin na základě různých hledisek. [2]

2.1.2 Souřadnicové měřící stroje s křížovým stolem

Mechanika této skupiny měřících strojů vznikla postupným vývojem měřících projektorů a mikroskopů. Skládá se většinou z mechanicky uloženého křížového stolu. Osa Z je také mechanicky uložena. Pro přesnější a teplotně stabilnější přístroje se vyrábí součástky z důvodu vysoké hodnoty tepelné vodivosti z materiálů na bázi hliníku a používají se speciální vodící systémy s konstantním napětím. Tyto přístroje jsou dnes převážně plně automatizované ve všech třech osách. Rozsah měření je asi od 200 mm do 400 mm. Větší rozsahy nejsou u tohoto typu konstrukce měřícího stroje hospodárné. Nejčastěji se používá senzorů na zpracování obrazu, proto jsou do měřícího stroje integrovány vysoce výkonné automatické systémy osvětlení procházejícím a dopadajícím světlem. Nejpřesnější měřící stroje této kategorie jsou ještě navíc vybaveny mechanickými snímacími systémy a laserovými senzory a tím se stávají multisenzorovými souřadnicovými měřícími stroji. [1] [2]



Obrázek 3 Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřících strojů

a) Stroj s křížovým stolem, b) Stroj se stolem konstrukce „L“ [1]

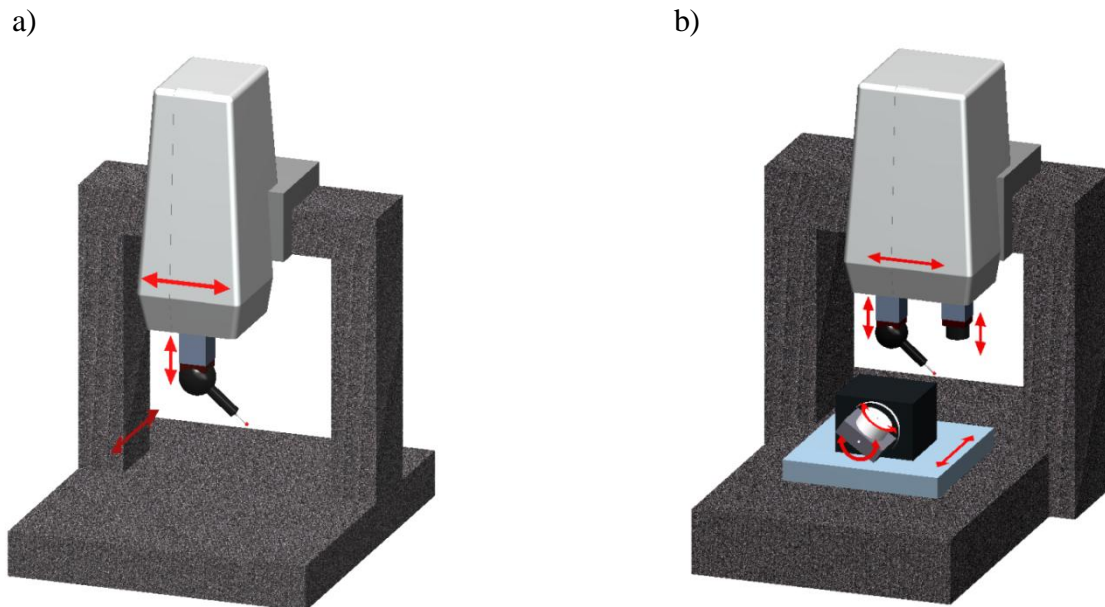
2.1.3 Souřadnicové měřicí stroje s portálem

Pro vyšší požadavky na přesnost a větší rozsahy měření se nahrazuje mechanické vedení konstrukce stolu systémy se vzduchovými ložisky. Vysoce přesné vodící dráhy se vyrábí zejména z tvrdé přírodní horniny – žuly, případně ze syntetických materiálů stejných vlastností. Po nich kloužou pohyblivé součástky na vzduchovém polštáři o tloušťce několika mikrometrů s nízkým třením. Z tohoto důvodu jsou potřebné síly pro pohyb měřicího portálu velice malé, až zanedbatelné. Chybějící hystereze v polohovacím systému má za následek nízké nejistoty měření. [1]

Tyto stroje vynikají tuhou konstrukcí a velkou kapacitou měřicího prostoru. Trojrozměrná kapacita souřadnicového měřicího stroje umožňuje měření součástí na pěti stranách při jednom ustavení na měřicím stole. Toto je velice důležité pro většinu velkých anebo tvarově složitých výrobků ve strojírenství (bloky motorů, karoserie automobilů, skříně převodovek apod.). [2]

Souřadnicové stroje s pohyblivým portálem ztělesňují v současnosti nejčastěji realizovaný konstrukční princip větších měřicích jednosenzorových i multisenzorových měřicích strojů. Portál souřadnicového měřicího stroje se skládá z mostu, který se pohybuje ve směru první osy (nejčastěji ve směru osy „Y“). Na mostu (portálu), tzn. ve směru druhé osy (nejčastěji ve směru osy „X“), se pohybuje měřicí suport, na kterém je nainstalována třetí osa – pinola (nejčastěji ve směru osy „Z“). Na sobě umístěné pohyblivé osy ovšem zabraňují použití komplexního uspořádání senzorů. V souřadnicových měřicích strojích s pevným portálem se pohybuje s měřeným objektem pomocí pohyblivého stolu ve směru první osy. Zbývající dvě osy jsou umístěny na portálu. Výhodou této konstrukce je mimo jiné to, že je možné pohony a odměřování všech tří os umístit centrálně a vysoká tuhost vede k velmi nízké nejistotě měření. Tato koncepce je velmi vhodná pro optické a multisenzorové souřadnicové měřicí stroje a je zde jednoduchá integrace osvětlovacích systémů s procházejícím světlem. Celkově stabilní konstrukce dovoluje také umístění více senzorů v jedné pinole. Problémům s případnou kolizí při použití více senzorů se dá zabránit změnou uspořádání z jedno-pinolového na více-pinolové uspořádání. Výměna senzorů se provádí zajetím a vyjetím příslušné pinoly. Dalším řešením problematiky s případnou kolizí senzorů je možné tak, že na jednu pinolu se umístí optický senzor (pevná pinola), na druhou plně otočnou a výklopnou pinolu se umístí dotekový senzor. Případnou výměnu dotekového senzoru za jiný senzor lze vyřešit instalací zásobníku s nosičem senzorů na kraj měřicího stolu mimo dosah pevné pinoly.

Otočné a otočně naklápějící osy dovolují trojrozměrné komplexní měření dílců na jedno upnutí. Speciální tvar konstrukce s pevným portálem pro malé rozsahy měření je konstrukce typu L. [1]



Obrázek 4 Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřicích strojů

a) Portálový stroj s pohyblivým portálem, b) Portálový stroj s pevným portálem [1]

2.1.4 Konstrukce souřadnicového měřicího stroje

Na průměrné desky, které tvoří základ souřadnicového měřicího stroje i na vodící plochy jsou kladeny vysoké požadavky v dosažení rovinnosti a kolmosti. Minimální úchylka rovinnosti vodících ploch, které jsou broušeny na speciálních bruskách, bývá kolem 0,005 mm/m, lapováním je možno dosáhnout až 0,002 mm/m. Velmi často se změny geometrické přesnosti, které vznikají nestabilitou u ocelových a litinových konstrukcí vylučují užitím kamene. Nejčastěji se používá přesně opracovaná žula.

Měřicí rozsah souřadnicového měřicího stroje je dán hodnotami jednotlivých souřadnic X, Y, Z. Je to prostor, který při měření obsáhne měřicí senzor. Většinou jsou však rozměry výrobku, měřeného na souřadnicovém měřicím stroji, menší. Kalibrace senzorů také zmenšuje měřicí rozsah. [2]

Pracovní deska

Nejčastěji se používá žulová granitová deska, v současnosti již méně litinový odlitek. Pracovní deska je ustavena na čtyřech základních podpěrách. Tyto podpěry mohou mít aktivní uložení, které pomocí připojeného počítače eliminují případné vibrace z okolí. Horní plo-

cha pracovní desky je broušená. V pracovní ploše jsou upínací otvory se závity. Pomocí těchto závitů, šroubů a upínek se připevňuje k pracovní ploše měřený kus nebo upínací systém. Na koncích desky je obvykle upevněno vedení, které lze seřizovat a po kterém pojíždí most.

Most

Tvoří složené uzavřené konstrukce, jehož stojiny tvoří různé ocelové profily. Překlad mostu slouží k vedení příčných saní (vozíku).

Vozík

Je obvykle deska s kalenými vodícími plochami. Uvnitř desky je vytvořen závěs pro uložení objímky pinoly s dotekovou sondou anebo s kombinací dotekové a optické sondy.

Pinola

Nejčastěji litinová nebo duralová tyč profilu H. Vyvažování pinoly může být mechanické, pomocí dvou souměrných závaží, nebo elektrické, pomocí servomotorů.

Vedení

Konstrukce pohyblivých částí souřadnicového měřicího stroje musí být provedena tak, aby se pohyblivé části mohly lehce posouvat s maximální přesností a bez trhavých pohybů i při minimálních rychlostech, které se vyskytují v koncových polohách anebo při velmi malé změně polohy. Pohyblivé části se ukládají na vedení s co nejmenším třením, s minimálním opotřebením a s maximální tuhostí celého zařízení. Z těchto důvodů se dnes již nepoužívá kluzných vedení. Jejich nevýhodou je velká složitost provedení, což vede k prodražování souřadnicového měřicího stroje. Jsou zde také problémy se svodem oleje, jeho těsněním a odvodem tepla.

Vhodnější a častěji používané technické řešení uložení je vedení aerostatické s plynným třením. Přednost tohoto vedení spočívá v tom, že nejsou potíže s odváděním oleje (jako u kluzného vedení). Velikou výhodou je velmi nízké tření i při vyšších rychlostech. Nedostatkem je možné poškození vedení při porušení vrstvy vzduchu (výpadek dodávky tlakového vzduchu) a snížená odolnost proti korozi (v případě znečištění tlakového vzduchu). Tyto nevýhody se dají eliminovat vhodným stabilním zdrojem velice čistého tlakového vzduchu. Při použití několikanásobného systému filtrace a použití aktivních uhlíkových filtrů lze zaručit čistotu tlakového vzduchu minimálně z 99,9%. Dříve často používaným řešením je vedení valivé, které bývá na kuličkách nebo válečkách. Jejich výhodou je velmi

malé tření, vysoká rovnoměrnost pohybů, která je u souřadnicového měřicího stroje jednou z podmínek pro přesná měření a vysoká tuhost. Přítomnost mazání na valivých vedeních nemá vliv na přesnost pohybů a zároveň výborně eliminuje vznik koroze. K nedostatkům valivých vedení patří složitost jejich přesného zhotovení. [1] [2]

2.2 Senzory pro souřadnicové měřicí stroje

Senzory souřadnicového měřicího stroje slouží k zachycení primárního signálu měřeného objektu. Jejich konstrukce z mechanických popřípadě i optických, elektronických a softwarových součástí je různě komplexní. Při výběru senzorů se musí vzít v úvahu podmínky na měřeném objektu, jako je citlivost objektu na dotyk a velikost měřených geometrických prvků a také požadavky z měřicích programů, jako je počet měřených bodů. Výběr senzoru, popřípadě senzorů tak záleží zásadně na měřicím úkolu.

Souřadnicové měřicí stroje mohou být vybaveny spínacími a měřicími senzory. Spínací senzory poskytují při snímání měřeného bodu pouze spouštěcí signál. Ten způsobí, že si přečtou systémy měřicí dráhu a určí souřadnice. Ke zjištění souřadnic některého bodu měřeného objektu je bezpodmínečně nutný pohyb ve směru os (dynamický princip měření). Měřicí senzory mají interně zabudovaný vlastní několikamilimetrový rozsah měření. Určení některého bodu objektu proběhne překrytím naměřených hodnot senzoru a přečtených souřadnic měřicího stroje. Určení některého bodu je tak možné i tehdy, když je souřadnicový měřicí stroj v klidu (statické princip měření). Předpokladem je pouze, aby byl bod objektu v rozsahu měření senzoru.

Další důležité rozlišovací kritérium pro senzory je fyzikální princip přenosu primárního signálu. V současnosti běžné senzory se v této souvislosti dělí na optické a dotykové senzory. Na optický senzor se přenáší informace o poloze měřeného bodu pomocí světla. Z toho lze stanovit příslušné souřadnice. U senzorů s méně než třemi stupněmi volnosti pro snímání se zajišťují zbývající souřadnice z předem změřené polohy snímacího bodu senzoru v souřadnicové soustavě stroje. U dotykových senzorů se tvoří tato informace dotykem měřeného objektu se snímacím prvkem, většinou snímací koulí. Další rozlišovací znak důležitý pro použití je dimenzování senzoru. Vypovídá, zda senzor snímá jednu, dvě nebo tři souřadnice. U senzorů s méně než třemi stupněmi volnosti pro snímání se zajišťují zbývající souřadnice z předem změřené polohy snímacího bodu senzoru v souřadnicové sou-

stavě stroje. Toto však omezuje použitelnost u komplexních trojrozměrných objektů a vede kvůli nutnosti umístit senzory do určité polohy k delším časům potřebným na měření. [1]

2.2.1 Dotykové senzory

Princip funkce všech dotykových senzorů spočívá v mechanickém dotyku měřeného objektu. Z toho se odvozují signály pro další zpracování. Rozlišují se spínací a měřicí snímací systémy. U dotykového senzoru je ve výsledku měření obsažena jak geometrie (tvar a velikost) snímacího tvarového prvku (koule), tak i poloha v prostoru a geometrický tvar měřeného povrchu objektu. [1] [4]

2.2.1.1 Spínací dotykové senzory

Jednoduché spínací snímací systémy pracují na principu soustavy tří bodů. Dotkne-li se snímací koule měřeného objektu, vytvoří se spouštěcí signál k přečtení systémů odměřování souřadnicového měřicího stroje. Měřený bod se získá ze souřadnic měřicího stroje a vztahuje se na střed snímací koule. Ta je přes tuhý dřík upevněna na trojbodovém uložení, u kterého funguje každý ze tří bodů jako spínač. Pokud se snímač vychýlí z libovolného směru, rozpojí se aspoň jeden ze spínačů. To se dále zpracuje jako spínací signál. Nevýhoda tohoto systému spočívá především v tom, že rozdílné snímací síly závislé na směru snímání vedou k různému prohnutí snímačů a tím k různému chování při snímání, které je závislé na směru (trojúhelníková charakteristika), což se dá jen obtížně korigovat.

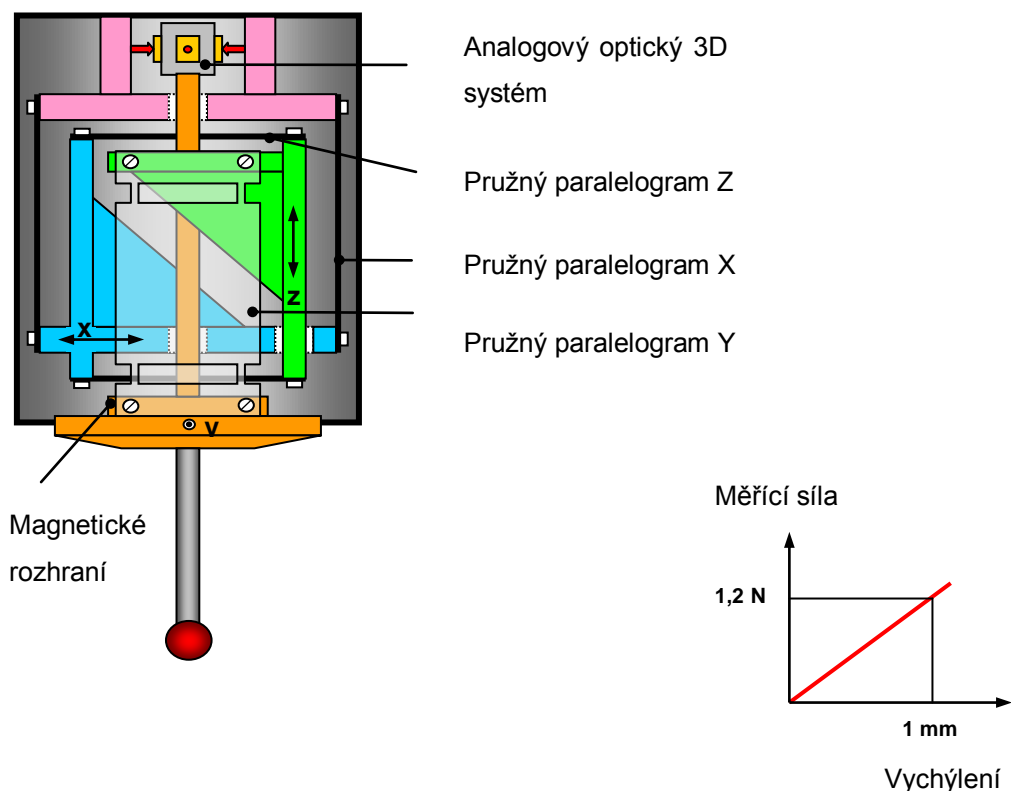
Vysoce kvalitní snímací systémy používají k převodu mechanického signálu na elektrické převodníky, jako např. piezoelektrické prvky nebo roztažné měřicí pásy. Pomocí nich se dá dosáhnout snímání, které je nezávislé na směru. Za nimi umístěná elektronika se stará o to, aby bylo možné pracovat s velmi malými snímacími silami. Nejistota měření ovlivněná senzorem je menší. Soustava tří bodů se vychýlí teprve po zjištění snímacího bodu. Tím jsou v osách přípustné poměrně velké brzdě dráhy. Celková nevýhoda všech spínacích systémů senzorů spočívá v tom, že souřadnicový měřicí stroj musí být ke zjištění měřeného bodu v kontaktu s měřeným objektem a potom zase musí odjet od objektu. Tím jsou pro každý měřený bod nutné časy pro snímání ve vteřinách. [1]

2.2.1.2 Měřicí dotykové senzory

U měřicího snímacího systému je senzor vybaven systémy s k měření dráhy (odměřování, indukční senzory, optické měřicí systémy), většinou ve všech třech souřadnicových osách. Pokud se snímací koule při dotyku s měřeným objektem vychýlí do libovolného směru, lze

zajistit velikost tohoto vychýlení přečtením systému měření dráhy. Měřený bod se znovu získá překrytím souřadnic senzoru a souřadnic souřadnicového měřicího stroje (analogicky jako měření na obraze-obrázek č. 1). K tomu přichází korekce snímací koule podle vektorové polohy snímané plochy a prohnutí snímače. Pro měření více bodů povrchu není bezpodmínečně nutné snímač zase odsunout od měřeného objektu. V kombinaci s odpovídajícím řídicím softwarem je to základ automatického skenování povrchů měřených objektů. Souřadnicové osy měřicího stroje jsou řízeny k tomu, aby byl senzor stále ve svém rozsahu měření. Při tangenciálním pohybu proto sleduje povrch měřeného objektu. Řídicí software pohybuje senzorem ve virtuální souřadnicové soustavě s počátkem v místě dotyku snímacího prvku s měřeným objektem. [1]

Moderní měřicí dotykový senzor může provádět jednak bodová měření, tak i plynulé skenování. Skenovací snímací systém umožňuje zaznamenat prvky a profily kontur velice rychle a ve velké hustotě bodů. Takový dotykový senzor lze použít také v místech, které optické senzory nezachytí. [4]



Obrázek 5 Princip 3D měřicí hlavy [1]



Obrázek 6 Skenování dotykovou sondou ve 2D [4]

2.2.1.3 Měřící dotykově optické senzory

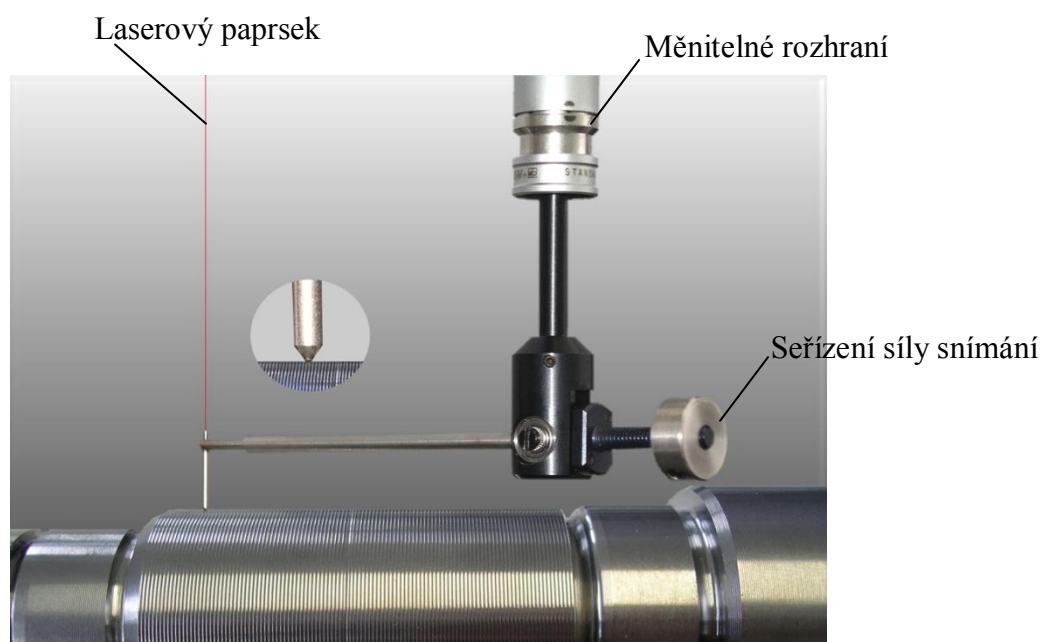
Klasické mechanické senzory mají společné, že přenáší signál ze snímacího tvarového prvku přes tuhý dřík k vlastnímu senzoru (spínač, piezoelektrický prvek). Protože každé prohnutí snímače má vliv na výsledek měření, přesnost změřeného bodu, je snaha používat pokud možno tuhé dříky. Spolu s použitými senzory to vede k poměrně velkým rozměrům a snímacím silám. Prakticky se pohybuje dolní hranice pro průměr snímací koule okolo několika desetin milimetru. Pro měření malých geometrických prvků jsou takové snímací systémy vhodné jen podmíněně. U mikrosond se těmito nevýhodám vyhnulo tak, že se dřík snímače používá jen k umístění snímací koule do požadované polohy. Vlastní měření polohy probíhá senzorem zpracování obrazu integrovaným do systému. Prohnutí dříku proto není v měření výsledku obsaženo. Ve své podstatě dvourozměrným principem mikrosondy se dají provádět i trojrozměrná měření, pokud povrch snímaného objektu svírá s osou mikrosondy dostatečně malý úhel. Integrací druhého směru pohledu senzoru zpracování obrazu do konstrukce mikrosondy (druhá kamera nebo zrcadlo) se dá zjistit poloha snímací koule i ve směru osy vlákna. Mikrosondy se většinou vyrábí tažením tenkých skleněných vláken a natavením koulí. Montáží do kovové trubičky se dosáhne toho, že se dá mikro-

sonda dobře umísťovat k místu měření. Z důvodu malých rozměrů vznikají jen velmi malé snímací síly (maximálně několik mikronevtonů). Tím je možné použití na měřených objektech zvláště citlivých na dotyk. Mikrosondy patří do skupiny měřících senzorů, proto jsou v principu vhodné ke skenování povrchů materiálů. Na základě principu účinnosti patří mikrosondy v současnosti k nejpřesnějším senzorům pro multisenzorové souřadnicové měřící stroje. [1] [3]

2.2.1.4 Dotykově optické měřící senzory

Dotykově optické měřící senzory kombinují snímací hrot senzoru kontur a laserovým senzorem k měření vzdálenosti. Tímto obrysovým senzorem je možné s největší přesností měřit drsnost a obrysy v souřadnicových měřících strojích. Laserový senzor se používá k měření povrchu dílců i k měření vychýlení snímacího hrotu senzoru kontur. Výhodou tohoto uspořádání je dodržení principu srovnávání (komparace). Použitím výměnného rozhraní lze alternativně přímo měřit obrysovým snímačem nebo laserem.

Integrace dotykově optického obrysového senzoru do souřadnicového měřícího stroje umožňuje plně automatické měření obrysů ve velkém měřicím rozsahu. Další výhodou je vysoká přesnost umístění měření v referenčním systému dílce. To není s klasickými stroji s měření obrysů možné. Vyhodnocení naměřených dat probíhá pomocí funkce softwaru pro drsnost, rozměr, tvar a polohu. [1] [3]



Obrázek 7 Obrysový snímač s laserovým senzorem a měnitelným rozhraním [1]

2.2.2 Vizualní senzory

Pod pojmem vizualní senzor se rozumí všechny senzory, které podobně jako lidské oko, mají za základ alespoň dvourozměrné zobrazení měřeného objektu. Senzor zachytí a vyhodnotí rozdělení intenzity tohoto optického obrazu. Po desetiletí bylo lidské oko jediný dostupný vizualní senzor pro optické souřadnicové měřicí stroje, jako jsou měřicí mikroskopy a měřicí projektory. Subjektivně podmíněné zdroje chyb při měření jsou například paralaxa (šikmý pohled) a chybné měření podmíněné logaritmickou citlivostí lidského oka na světlo u přechodů světlá-tmavá, například na hranách měřeného objektu. Výsledky měření závisí proto zásadně na obsluze a jsou srovnatelné pouze podmíněně. Rychlost měření je také značně omezena. Přes všechny nevýhody představuje vizualní snímání i u moderních strojů na zpracování obrazu poslední možnou alternativu. Používá se, když jsou měřené struktury objektu velmi špatně viditelné a geometrické prvky lze snímat pouze intuitivně. Předpokládáme-li, že má lidské oko při pozorování nitkového kříže schopnost rozlišení několika desetin milimetru, lze touto metodou například při stonásobném zvětšení optiky dosáhnout rozlišení několika mikrometrů. [1]

2.2.2.1 Hranový senzor

Hranový senzor je spínací senzor pro měřicí projektory. Tenké skleněné vlákno zachycuje světelný signál v dráze paprsků projektoru a vede jej na fotomultiplikátor. Pohybuje-li se měřeným objektem přes dráhu paprsků, vytvoří každá hrana přechod světlá-tmavá popřípadě tmavá-světlá. Pokud se rozezná elektronickou metodou prahových hodnot přechod hrany, přečtou se souřadnice měřicího stolu. Důležité je správné určení prahové hodnoty na kalibrovaných etalonech. U moderních systémů se to děje plně automaticky.

Použití hranového senzoru je v praxi omezeno na dvou až dvou a půl dimenzionální měření metodou využívající procházející světlo. Dvou a půl dimenzionálně znamená, že ve třetí ose je možné přestavení, ale není možné měření. Nízké kontrasty, jaké se většinou vyskytují v dopadajícím světle, mohou vést k chybám měření, protože bodový senzor nepřipouští téměř vůbec strategie k rozlišení mezi znečištěním, povrchovými vadami a skutečnými snímanými geometrickými prvky na měřeném dílci. [1]

2.2.2.2 Senzor zpracování obrazu

Jako vizualní senzor se dnes většinou používá senzor zpracování obrazu. Měřený objekt se přes objektiv zobrazí na maticové kameře. Elektronika kamery převede optické signály na digitální obraz, který se použije k výpočtu měřených bodů ve vyhodnocovacím počítači

s odpovídajícím softwarem pro zpracování obrazu. Na výkonnost takových senzorů mají rozhodující vliv různé jednotlivé součástky, jako je osvětlení, optika, čip senzoru, elektronika a algoritmus pro výpočet. Nejlepší výsledky, pokud jde o nejistotu měření, se dají dosáhnout telecentrickými objektivy. Telecentrie má tu výhodu, že při změně pracovní vzdálenosti v rámci telocentrického rozsahu zůstává měřítko zobrazení konstantní a tím nejsou způsobeny žádné další odchylky měření. Toto je důležité zvláště u menších zvětšení. Nejlepší kvalitu dosahují telocentrické objektivy s pevným zvětšením. [1]

2.2.2.3 Zoomovací objektivy

Nevětší flexibilita se dosahuje použitím zoomovací techniky. Z důvodu najíždění polohy optických součástek v objektivu lze sice očekávat nepatrné ztráty přesnosti, ty jsou však u moderních systémů dalekosáhle zanedbatelné. K dosažení vysoké reprodukovatelnosti najíždění poloh je většinou použito lineární vedení. Pohyb skupiny čoček potřebný pro zoomování probíhá motoricky. Tato konstrukce umožňuje asi jedno- až desetinásobné zvětšení a pracovní vzdálenost v rozsahu od 30 mm až po maximálně 250 mm. Tím se může uskutečnit optimalizace mezi měřícím rozsahem senzoru a dosažitelnou nejistotou měření (zvětšení). Do velké míry nezávisle na tom lze přizpůsobit pracovní vzdálenost požadavkům měřeného objektu (problematika kolize). K digitalizaci obrazů se dnes obvykle používají CCD kamery společně s počítačovými součástkami pro zachycení obrazu. Výhodou CCD kamery oproti systému CMOS je dobrá metrologická kvalita. Zvláště lineární vztah mezi vstupním signálem (intenzita světla) a digitálním výstupním signálem je potřebný pro přesné měření. I software, kterým se zjišťují měřené body z digitalizovaných dat obrazu, ovlivňuje významně kvalitu výsledků měření senzorů obrazu.

V zásadě se rozlišují dvě koncepce softwaru a to vyhledávač hran a zpracování obrysového obrazu. Pomocí vyhledávače hran se zjišťují průsečíky přímek předem definovaných v obraze s viditelnými obrysy objektu. Toto se postupně opakuje na mnoha místech v předem určené vyhodnovací oblasti (okno). Tak vznikne množství měřených bodů, které jsou oknem sloučeny do skupiny. Pro každé určení jednotlivého bodu proběhne však samostatné jednorozměrné vyhodnocení. Rozsáhlá dvourozměrná informace obsažená v obraze se tak nezohlední. Toto vede zvláště při měření v dopadajícím světle k problémům. Rušivé obrysy způsobené povrchovými strukturami, vylomením a znečištěním se dají rozeznat a kompenzovat jen podmíněně. Při zpracování obrysového obrazu se obraz bere v rámci vyhrnovacího okna jako plošný celek. V tomto obraze se vhodnými matematickými algoritmy (operátory) extrahují obrysy. Každému obrazovému bodu (pixel

- prvek obrazu) obrysu se tak přiřadí měřený bod. Měřené body se tak řadí za sebou jako perlový náhrdelník. To dává možnost zjistit rušivé vlivy při měření a odfiltrvat je, aniž by se změnil tvar. Uvnitř zachycené oblasti totiž může být více obrysů. To je důležité pro použití v praxi. Rozlišení popřípadě nejistota měření je přímo omezena vzdáleností pixelů. Vysoce kvalitní systémy interpolují ve druhém kroku v rámci pixelové mřížky (výpočet subpixelů) a dovolují tak vyšší přesnosti. [1]

2.2.2.4 Osvětlení pro vizuální senzory

Základ každého optického měření tvoří co možná silně kontrastní znázornění měřených geometrických prvků. Nejsnadněji se to daří na vnějších hranách měřených objektů. V tomto případě se může pracovat v procházejícím světle. Ideální předpoklady nabízí ploché měřené objekty. U hran vybíhajících do prostoru je však třeba mít na paměti vzájemné působení mezi osvětlením, měřeným objektem a zobrazovací dráhou paprsků. Výrobce souřadnicového měřicího stroje se musí postarat o to, aby úhly rozevření (apertury) jednotlivých optických systémů byly navzájem sladěny a software zpracování obrazu poskytoval možnost k dostatečně dobré kalibraci algoritmů pro určení polohy hran. Pro speciální použití, jako měření rotačně symetrických dílců (např. ležící válce) se používají zvláštní, prosvěcovací jednotky s nastavitelnou aperturou.

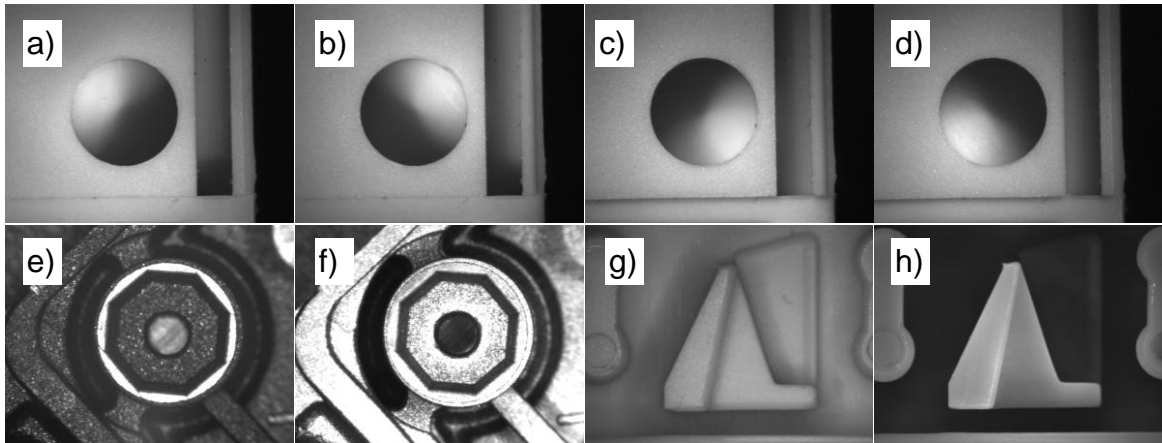
Použití vizuálních senzorů vyžaduje vedle osvětlení procházejícím světlem většinou i osvětlení dopadajícím světlem. Rozlišujeme dva druhy nasvícení. A to nasvícení světlých polí a nasvícení tmavých polí.

Nasvícení světlých polí se promítá na měřený objekt rovnoběžně s osou dráhy paprsků. V ideálním případě to probíhá přímo přes systémy čoček zobrazovací optiky. Tento způsob osvětlení dosahuje např. na povrchu kovů přímý odraz. Měřený objekt se zobrazí světle. Nakloněné plochy odráží světlo mimo objektiv a jsou tak zobrazeny tmavě. Nasvícení tmavých polí dopadá na měřený objekt pod šikmým úhlem vůči zobrazovací dráze paprsků.

Většinou se používá kruhové uspořádání osvětlení, jako například kruhové osvětlení skleněnými vlákny. Tyto mají výhodu nízkého vyzařování tepla do měřicího prostoru. Rozdělením na segmenty po 90° se dají vytvořit světelné efekty z různých směrů prostoru. Svítící LED diody umožňují optimálně přizpůsobit nasvícení tmavých polí měřicímu úhlu. Zapnutím různých dalších skupin diod je možné vytvořit různé úhly osvětlení. U moderních multisenzorových souřadnicových měřicích strojů se dají všechny zdroje světla automatic-

ky ovládat pomocí měřicího softwaru stroje. Světlost lze regulovat pomocí světla odraženého od objektu. To umožňuje optimální použití v praxi při měření se povrchu materiálů.

[1] [3]



Obrázek 8 Měřené objekty při různých způsobech osvětlení a) až d) nasvícení tmavých polí z různých směrů, e) a f) nasvícení světlých a tmavých polí na stejném objektu g) a h) zlepšení kontrastu plochým osvětlením [1]

2.2.3 Senzory měřící vzdálenost

Vizuálními senzory lze provádět měření jen v rovinách. Tím je možné jen měření dvourozměrných (2D) popřípadě stupňovitých ($2^{1/2}D$) objektů. Aby bylo možno optickými senzory provádět trojrozměrné (3D) měření dílců, je potřebná doplňková metoda k měření ve třetí souřadnici.

Protože senzory, které se k tomu používají, zjišťují vzdálenost mezi senzorem a povrchem dílce, označují se jako senzory měřící vzdálenost. [1]

2.2.3.1 Autofokus

Pro autofokus se používají stejné hardwarové součástky jako pro zpracování obrazu. Při pojiždění senzoru ve směru optické osy se vytvoří ostré zobrazení jenom v jedné poloze. Je-li sensor rozostřen, vzniknou neostře obrazy. Jako veličinu pro stav zaostření obrazu lze použít kontrast. Pohybuje-li se sensor ve směru optické osy v oblasti, v níž leží rovina objektu, dosáhne tak hodnota kontrastu svého maxima, když rovina zaostření souhlasí s rovinou měřeného objektu. Z této polohy senzoru lze určit polohu bodu na povrchu. Na tento bod lze potom zaostřit umístěním do této polohy. U běžných objektivů se dosáhnou nejpříznivější výsledky s vysokým zvětšením. Nevýhoda autofokusu spočívá v tom, že se musí pro zaostření projet určitá oblast ve směru optické osy.

Aby se dosáhlo vysoké přesnosti, je potřeba na každý měřený bod několik vteřin. Tato potřeba času je v protikladu s velmi vysokou rychlostí optických senzorů. Tak vyhodnotí zpracování obrazu několik tisíc bodů za vteřinu.

Rychlé měření vzdálenosti dovoluje metoda využívající autofokus pomocí tří sensorových čipů pevně namontovaných na různých místech v zobrazovací dráze paprsků, které jdou společně k jedné kameře. [1]

2.2.3.2 Laserové bodové senzory

Princip měření laserového bodového senzoru spočívá v tom, že se na měřený objekt promítá světelný paprsek vytvořený laserem (laserová dioda). Odrážející se světla skvrna se zobrazí na optoelektronickém senzoru. Vhodným postupem se odvodí plocha měřeného bodu. Většina známých metod spadá je interferometrická a nebo triangulační metoda.

Triangulační senzory jsou často používané v automatizační technice fungují podle následujícího principu. Laserový paprsek a osa zobrazovací optiky svírají úhel několik desítek stupňů. Tak se vytvoří mezi laserovým vysílačem, měřeným bodem a senzorem trojúhelník, z něhož se dá zjistit hledaná vzdálenost pomocí vztahů mezi úhly (triangulace). Výsledek měření silně závisí na struktuře a úhlu sklonu povrchu. To vede k poměrně veliké nejistotě měření, která dovoluje použití této metody jen v několika přesných souřadnicových měřicích strojích.

Lepší výsledky se dají dosáhnout s laserovými senzory, které fungují na Foucaultově principu. Využívají úhel apertury zobrazovací optiky senzoru jako trigonometrický úhel. Namísto laserového bodu se zobrazí na objektu Foucaultovo rozhraní, které se nalézá v dráze paprsků. Vyhodnocení signálu proběhne pomocí diferenčních fotodiod. Odchytky od nulové polohy laserového senzoru zjištěné tímto způsobem se používají k doregulování v příslušné ose souřadnicového měřicího stroje. Výsledek měření se získá z překrytí naměřených hodnot laserového senzoru a souřadnicového měřicího stroje. I u tohoto typu laserového senzoru ovlivňuje povrch materiálu a sklon povrchu značně výsledek měření, takže je potřeba korekce veličin těchto vlivů. Vhodným softwarem však lze nejistotu měření snížit do té míry, že splňuje požadavky vysoce přesných souřadnicových měřicích strojů.

Výhoda laserového bodového senzoru oproti laserového senzoru pracujícím na Foucaultově principu spočívá v mnohem vyšší rychlosti měření. Za vteřinu se dá změřit několik set až tisíc bodů. Tyto senzory se hodí i ke skenování povrchových profilů. [1]

2.2.3.3 Vícerozměrné laserové senzory na měření vzdálenosti

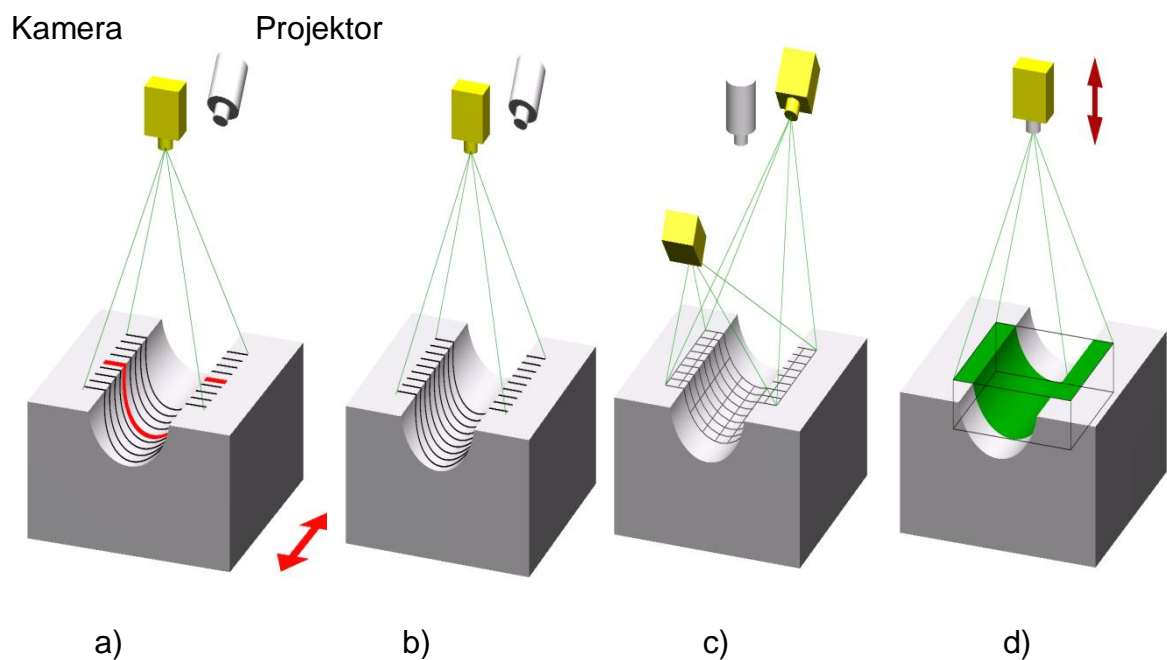
Liniové senzory (2D) a plošné senzory (3D) fungují podobněji bodové senzory při měření sádelnosti (1D). U metody linie laserového paprsku se rozšiřuje klasická laserová triangulační metoda na dvourozměrné měření tak, že se laserový paprsek uvede do pohybu pomocí pohyblivého zrcadla integrovaného v hlavě senzoru. Vyhodnocení pak proběhne pomocí maticové kamery tak, že se získá výsledek měření pro mnoho bodů zjištěných pomocí triangulace. Tím se změří linie (světelný řez) na povrchu měřeného objektu. K měření trojrozměrného povrchu se pohybuje souřadnicový měřicí stroj kolmo k rovině řezu.

I pruhové senzory pracují na triangulačním principu. Pomocí projektoru se promítají na povrch materiálu vzory pruhů a vyhodnocení probíhá analogicky jako u metody linie laserového paprsku. Leží-li celý trojrozměrný povrch uvnitř oblasti měření, není nutný pohyb ve směru souřadnicových os. Aby se dosáhlo většího rozlišení s jednoznačným přiřazením bodů k jejich prostorovým souřadnicím, promítají se obvykle postupně různé vzory a vyhodnocují se. Posunem fází je možné realizovat určitý způsob vytvoření subpixelů. V principu se k tomu posunují vzorky po krocích a každý krok se vyhodnocuje.

Fotometrická metoda má za základ zachycení povrchu objektu ze dvou různých směrů, vždy jedním obrazovým senzorem z každého směru. Podle triangulačního principu se vy počítají prostorové souřadnice každého zjištěného geometrického prvku objektu pomocí vztahu mezi úhly. Protože měřený objekt zpravidla není dostatečně strukturován, promítne se na povrchu dvourozměrná mřížka. Vzniklý vzor se zachytí oběma kamerami a následně vyhodnotí. Na rozdíl od pruhového senzoru, nemá přesnost projekce vliv na výsledek měření.

Laserový senzor Werth 3D-Patch umožňuje zvláště jednoduché a rychlé trojrozměrné zachycení povrchů. Provádí autofokusovou metodou s pohyblivou kamerou pro všechny body obrazu současně. Jedním projetím požadované oblasti měření ve směru optické osy dostaneme za několik vteřin velké množství naměřených bodů. Výhoda této metody spočívá zvláště v tom, že kromě standardního senzoru zpracování obrazu není potřebný žádný doplňkový hardware.

Měření komplexních dílců s většími oblastmi měření tak vyžaduje umístění senzorů pomocí souřadnicového měřicího stroje na požadované místo. V praxi jsou takové 3D senzory vybaveny většími rozsahy měření (několik desítek milimetrů) a používají se k měření obecných ploch a jiných geometrických prvků s většími tolerancemi.



Obrázek 9 Vícerozměrné senzory na měření vzdálenosti a) linie laserového paprsku, b) pruhová projekce, c) fotogrammetrie, d) Werth 3D-Patch [1]

2.2.4 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (CT) umožňuje úplné zachycení měřeného objektu nezávisle na jeho komplexnosti. Zachytí se jak vnější tak i vnitřní geometrie. Průmyslové využití počítačové tomografie bylo dosud kvůli nedostatečné přesnosti omezeno na zkoušení materiálu. Teprve kombinace s jinými senzory umožnila použití počítačové tomografie v souřadnicových měřicích strojích s přesností, jaká se očekává. Z důvodu krátkých časů měření vede využití těchto strojů ke značnému zrychlení procesu a ke zvýšení hospodárnosti. [1]

2.2.4.1 Princip počítačové tomografie

Pro rentgenovou tomografii se využívá schopnost rentgenového záření pronikat objekty. Na cestě skrz objekty se část záření absorbuje. Čím větší je délka prozařování v objektu, tím méně záření vystupuje za objektem. Závisí to i na pohlcování materiálu. Rentgenový detektor (senzor) zachycuje procházející rentgenové záření jako dvourozměrný rentgenogram metodou procházejících paprsků. Při velikosti detektorů od asi 50 do 200 mm lze zachytit velkou část měřeného objektu v jednom obraze. [1]

Aby se mohla provést tomografie objektu, snímá se postupně několik set takových dvourozměrných rentgenogramů metodou procházejících paprsků v různých polohách otočení měřeného objektu. Měřený objekt se k tomu umístí na otočném stole, který se postupně

otáčí. Trojrozměrná informace o měřeném objektu obsažené v této posloupnosti obrazů se vhodnou matematickou metodou extrahuje a je k dispozici jako tzv. voxelový obraz. Každý voxel (Volumen-pixel - objemový pixel) představuje pro jedno definované místo v rozsahu měření absorpci rentgenového záření měřeným objektem. Podobně jako při dvourozměrném zpracování obrazu se z voxelových dat vhodnou metodou vypočítávají vlastní měřicí body. Použité senzory mají v současnosti až 4 miliony obrazových bodů. Měřené body se mohou vyhodnotit známými metodami souřadnicové měřicí techniky. V rozsahu měření z toho vznikne typicky několik set tisíc až několik miliónů měřících bodů, které jsou rovnoměrně rozděleny na povrchu měřeného dílce. Zachytí se i geometrie uvnitř měřených objektů, jako duté prostory nebo úkosity. Měřené body se mohou vyhodnotit známými metodami souřadnicové měřicí techniky.

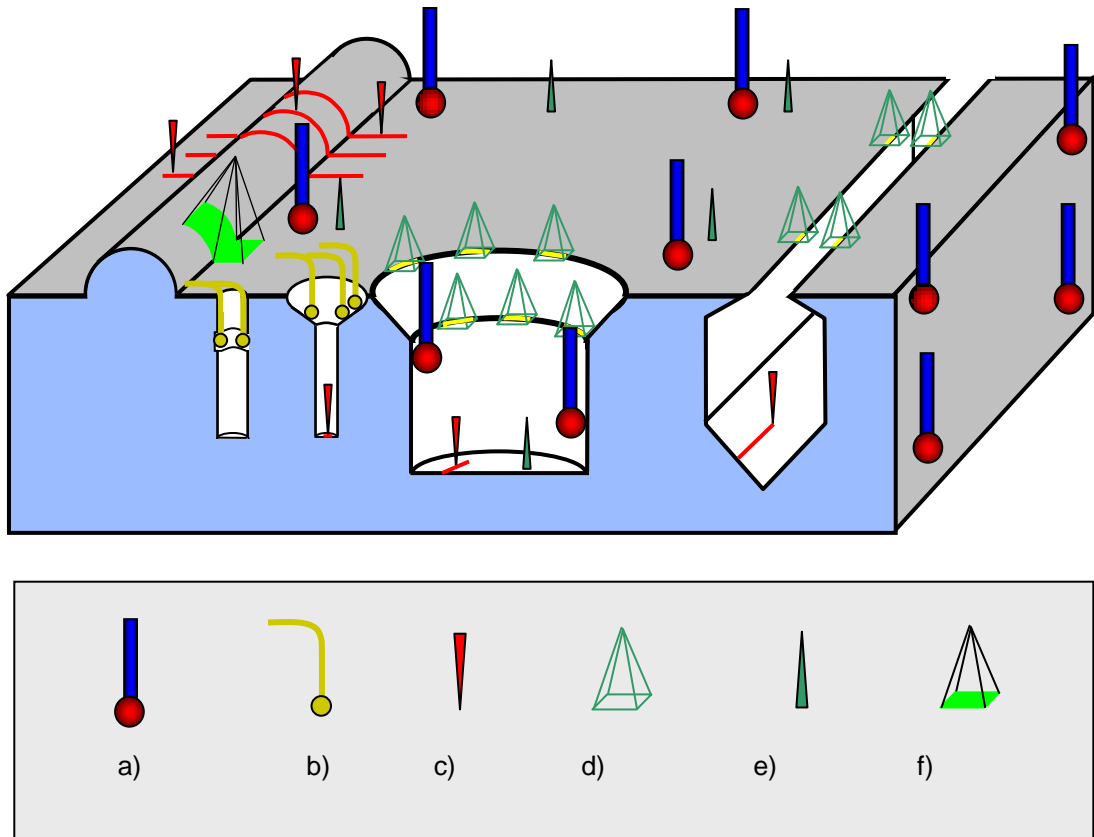
V mnoha případech nestačí velikost senzoru nebo počet pixelů, který je k dispozici, aby se dala provést počítačová tomografie podle požadavků. V těchto případech se posunutím otočného stolu s měřeným objektem relativně k součástkám rentgenu navzájem spojí více obrazů. Opětovné sestavení voxelového prostorového obrazu proběhne ze sloučených 2D obrazů. [1] [3]

2.2.5 Multisenzorová technika

V multisenzorových souřadnicových měřících strojích se používají různé kombinace měřících senzorů. V závislosti na základních vlastnostech senzorů vyloučí různá těžiště použití. Důležité rozlišovací znaky v souvislosti s použitím je velikost snímatelných geometrických prvků objektů, druh geometrických prvků objektů (hrana, plocha) a také vhodnost k rychlému zachycení mnoha bodů (skenování). Aby bylo možné řešit komplexní měřicí úkoly, je většinou potřebné použití více senzorů v průběhu jednoho měření.

Multisenzorové souřadnicové měřicí stroje dosáhly velké dokonalosti a patří k nejpřesnějším optickým měřícím strojům. Jaký bude jejich další vývoj? Snahou výrobců měřicí techniky je snižování dosud relativně vysokých nákladů na zaškolování operátorů a na tvorbu kontrolních plánů a příslušných programů. Při návaznosti měřených hodnot na data CAD bude stále více aktivit přesouváno od operátora na počítač. V oblasti senzorů jsou vývojové práce orientovány na zvyšování citlivosti proti vlivům kontrolovaných obrobků (povrch, barva) a integraci softwarových modulů. U vláknového snímače se orientuje vývoj na třírozměrné použití a umožnění měřit také drsnost, resp. texturu povrchu. A samozřejmě průběžný úkol zvyšování přesnosti měření, což je podmíněno stále se zužujícími výrobními

tolerancemi v mikro technologii a nanotechnologii a náročnými požadavky norem pro posuzování shody nebo neshody se specifikací měření. [5]



Obrázek 10 Multisenzorová technika a) mechanický snímač, b) mikrosonda, c) laser, d) zpracování obrazu e) autofokus f) Werth 3D-Patch [1]

2.3 Přesnost měření

Pod pojmem přesnost měření se v hovorové řeči rozumí vše, co charakterizuje přesnost výsledků měření. Při bližším pohledu se však ukazuje, že se musí rozlišovat mezi různými kategoriemi:

1. Definice charakteristických veličin souřadnicového měřicího stroje

Specifikuje se metrologická výkonnost a určí se metoda k jejímu stanovení.

2. Metoda ke zjištění nejistoty výsledků měření

Sledují se všechny vlivy při měření geometrických prvků na dílcích.

3. Poměr nejistoty měření vůči toleranci geometrických prvků

Stanoví se a zkontrolují vhodné veličiny a hodnoty.

Samozřejmě musíme uvažovat nad tím, že výsledky měření musí splňovat mezinárodní standardy. To nám zajistí, že se rozměry budou měřit na celém světě stejně. Mají-li se regulovat čistě interní procesy, stačí často jen sledování reprodukovatelnosti. [1]

2.3.1 Specifikace a vstupní kontrola

Nejdůležitější vlastností souřadnicového měřicího stroje je jeho přínos k dosažitelné nejistotě měření v měřicím procesu. Uživatel musí porovnat navzájem různé měřicí stroje, definovat podmínky nákupu a být schopen zkontrolovat funkci. V řadě norem jsou k tomu definovány specifikace a popsány postupy, jak to zkontrolovat. V podstatě se kontrola souřadnicových měřicích strojů soustřeďuje na odchylku snímání a odchylku měření délky.

Kontrola odchylky snímání slouží k charakterizování chování použitých senzorů a reprodukovatelnosti měření. K tomu se změří kalibrovaná koule s předem definovaným počtem měřených bodů a rozpětí jednotlivých bodů okolo vyrovnávacího prvku koule se zjistí mezní hodnota (odchylka snímání). U mechanických snímačů omezuje výkon především sama snímací koule, prohnutí dřívku a také nelinearity a oblasti necitlivosti (při změně směru) v měřicí hlavě, u optických senzorů jejich rozlišení, optické zvětšení objektivů, hloubka ostrosti při měření s autofokusem a, v případě laserových senzorů i např. činitel odrazu povrchu materiálu. Z vlastního stroje vstupuje především rozlišení odměřování a vibrace. Zatímco koule lze snímat dotykovými senzory obousměrně ze všech stran, je u mnoha optických senzorů možné jen jednosměrné snímání. Aby bylo umožněno rovněž obousměrné snímání, musí se použít otočně naklápěcí kloub, který se musí rovněž zkontrolovat. [1]

Odchylka měření délky zachycuje jak chování senzoru při snímání, tak i na délce závislou odchylku měření podmíněnou mechanickými odchylkami vodících prvků, geometrickou korekci softwaru a teplotním chováním. Odchylka měření délky se u dotykových senzorů kontroluje měřením délek na paralelních nebo stupňovitých měrkách. U optických senzorů se postupuje podobně, používají se jiné normálie jako měrky ze skla s čárkami z chrómu. U jedno a více rozměrných senzorů na měření vzdálenosti není možné obousměrné snímání základních měrek. V tomto případě se používají kalibrační desky s kružnicemi nebo tyče s kalibračními koulemi.

Aby byla zajištěna porovnatelnost s dotykovým měřením na základních měrkách, musí se však při této metodě měření provést matematická korekce. Ta zohledňuje, že při měření základních měrek ovlivňuje výsledek měření chyba v kalibraci senzoru (nesprávný průměr snímací koule, nesprávný nulový bod laseru, nesprávné zvětšení), naproti tomu při měření

koule jej neovlivňuje. Současně se ve výsledku koriguje středící efekt dosažený snímáním koule s mnoha měřenými body (několik desítek bodů).

Specifikace stroje je silně ovlivněna použitou konfigurací senzorů. U všech vstupních kontrol se proto musí dbát na to, aby se dodržela konfigurace senzorů specifikována v parametrech stroje. Pokud se konfigurace senzorů liší, lze očekávat další zvýšení nejistoty měření. [1] [2] [3]

2.3.2 Nejistota měření

Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Vyjádření výsledku měření je úplné pouze tehdy, pokud obsahuje jak vlastní hodnotu měřené veličiny, tak i nejistotu měření patřící k této hodnotě. [7]

Každé měření rozměrů na dílcích, jako je délka, úhel, rádius, tvar a poloha je tedy zatíženo nejistotou měření. Celý proces měření technikou stroje, vlastnostmi dílců, geometrií prvků, okolním prostředím a obsluhou má vliv na velikost této nejistoty měření. U reálných měření vstupuje do výsledku hlavně geometrie prvků. Např. při měření rádiusu můžeme použít část kružnice s podstatně nepřesnějším výsledkem než je rádius celé kružnice. Při měření úhlů nebo směrů os vstupuje do nejistoty měření přímo délka ramen. Další vlastnosti dílců, jako tvar, drsnost a znečištění mají další vliv.

Abychom získali celkovou hodnotu nejistoty měření, musí se navíc odhadnout během fáze zkoušení nezohledněné působící parametry, jako např. dlouhodobé kolísání teploty.

U multisenzorových souřadnicových měřících strojů jsou kromě jiných vlastností stroje pro dosaženou nejistotu měření zvláště důležité parametry senzorů.

Pro dotykové souřadnicové měřící techniky se dá nejistota měření odhadnout pomocí simulací. Pro optické a multisouřadnicové měřící stroje ještě není metoda simulace k dispozici, protože simulace chyb pro optické senzory není ještě zvládnutá.

K určení nejistoty je možné použít metodu měření kalibrovaných dílců. Touto metodou se dají zjistit i hodnoty korekce, kterou se dá systematický podíl nejistoty měření významně snížit. Běžně se používá při měření měrek a hřidel. U multisenzorových souřadnicových měřících strojů je jako náhradní řešení možné nahradit kalibraci dílců měřením vysoce přesnými senzory (např. mikrosonda WFP) na tomtéž souřadnicovém měřícím stroji. Tak se dají zkontrolovat systematické odchylky měření např. u optických měření. [1]

Níže uvedená tabulka je členěna podle typu nejdůležitějších senzorů a shrnuje parametry ovlivňující odchylku stroje popř. nejistotu měření celého měřicího procesu.

Zpracování obrazu	Autofokus	Snímač	Laserový snímač	Mikrosonda
Způsob osvětlení	Hloubka ostrosti objektivů	Průměr snímací koule	Materiál referenční koule	Procházející svět- lo nebo režim vlastního osvětlení
Optické zvětšení	Kontrast na po- vrchu materiálu	Délka snímače	Sklon povrchu	Optické zvětšení senzoru zpracová- ní obrazu
Zobrazovací optika	Intenzita osvět- lení	Průměr dříku	Optické zvětšení laserového senzoru	Kontrastní poměry podmíněné hloub- kou zasunutí
Intenzita osvětlení	Způsob osvětlení	Hmotnost konfigu- race snímačů	Rychlost skenování	Metoda kalibrace
Rozlišení kamery		Rychlost snímání	Intenzita laseru	
Metoda zjišťování hran		Směr snímání		

Tabulka 1 Parametry senzorů, které ovlivňují dosažitelnou nejistotu měření [1]

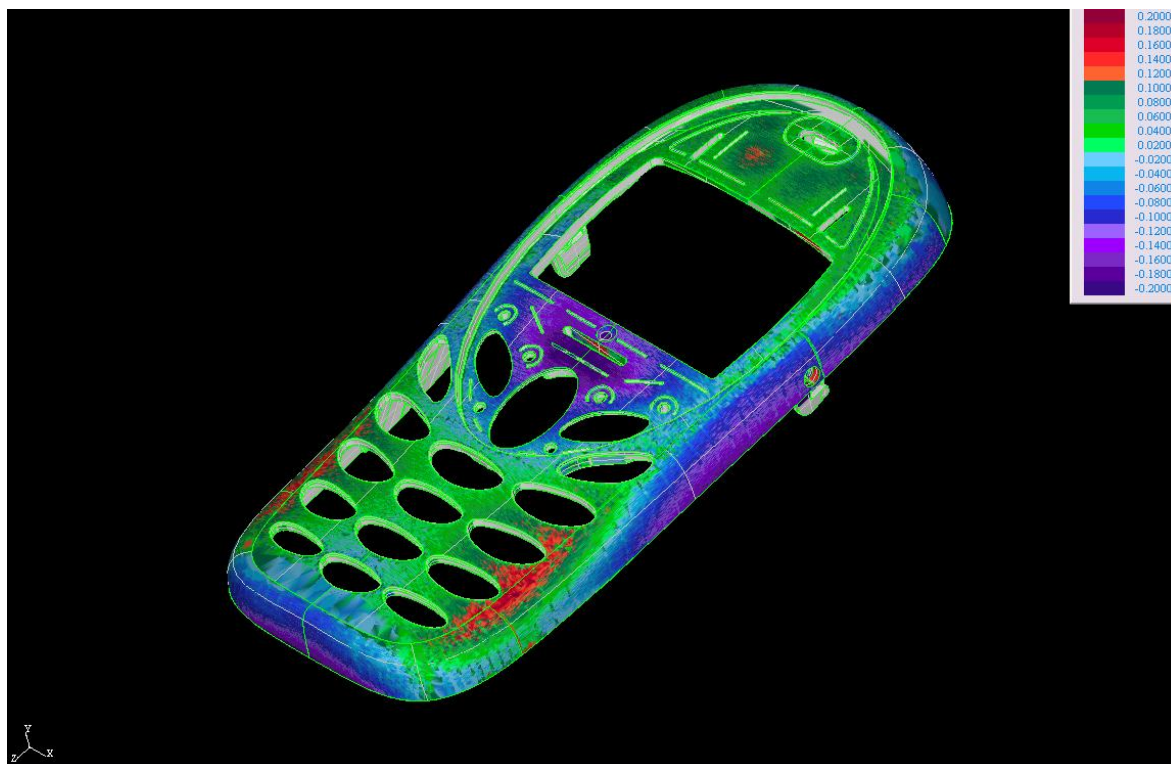
2.3.3 Vhodnost měřicího procesu

Při kontrole vhodnosti měřicího procesu jde o porovnání dosažitelné nejistoty měření včetně všech vlivů s tolerancí, která je rovněž ve vztahu ke geometrickým prvkům. Pro zjištění vhodnosti měřicího procesu musí být nejistota měření významně menší, než příslušná tolerance rozměru. Nejistota měření příslušných procesů měření hraje významnou roli především ve vztahu mezi dodavatelem a odběratelem. Dodavatel musí snížit meze tolerance, které má dodržovat a garantovat o nejistotu měření svých souřadnicových měřicích strojů. Odběratel musí zase rozšířit toleranci o nejistotu měření svých strojů nainstalovaných v oddělení vstupní kontroly. Protože nemůže dodavatele zatěžovat svou vlastní nejistotou měření, smí reklamovat teprve tehdy, když budou překročeny tyto rozšířené mezní hodnoty. [1] [7]

2.4 Software strojů

Software multisenzorových souřadnicových měřících strojů zabezpečuje účinnou a jednoduchou činnost systému. Mimo jiné umožňuje, aby i netrénovaní operátoři mohli využívat toto zařízení, proto byl dán velký důraz na grafické uživatelské rozhraní. Změřené geometrické elementy jsou graficky znázorněny jako CAD výkres, jednoduchým kliknutím na elementy je lze označit a následně snadno vyprodukovat rozměry či konstrukce. Výsledky jsou stejně jednoduše znázorněny jako při čtení z výkresu. V CAD-Online módu je činnost redukována na absolutní minimum. Operátor jednoduše musí vybrat geometrické elementy, jež mají být měřeny, kliknutím myši na CAD data, ty jsou následně přeměřeny plně automaticky. Běžným softwarovým vybavením je porovnání naměřených bodů a kontur vůči 3D CAD modelu, kdy výsledkem měření je barevná mapa odchylek (popř. odkazů) měřených bodů od nominálního 3D CAD modelu. [3]

Často opakující měřené postupy se mohou vytvořit pomocí funkce učení. Po vytvoření programu se program uloží do databáze programů, kde je kdykoliv k dispozici. Obrovskou výhodou je ušetřený čas při měření dalšího dílce pomocí již vytvořeného programu a větší přesnost měření v automatickém režimu.



Obrázek 11 Měření 3D povrchů s porovnáním 3D CAD [1]

2.5 Statistické veličiny pro praktickou část

V praktické části bakalářské části se budeme zabývat měřením přesnosti dutiny formy. Pro vyhodnocení naměřených výsledků bude použito následujících statistických veličin a matematických vztahů pro jejich výpočet:

Aritmetický průměr - je hodnota, která vznikne součtem všech hodnot a je podělena jejich počtem. Je definován vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Medián - je hodnota, jež dělí řadu podle velikosti seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Platí, že nejméně 50 % hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu. Je definován vztahem:

$$\int_{-\infty}^m f(x) dx = 0,5$$

Variační rozpětí R - vyjadřuje rozdíl mezi naměřenou maximální a minimální hodnotou. Je definováno vztahem:

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

Standardní nejistoty typu A - U_A - jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Je definována vztahem:

$$u_A \equiv s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CHARAKTERISTICKÁ SPOLEČNOSTI A PRODUKTU

3.1 Barum Continental spol. s r.o. divize výroby forem

Barum Continental spol. s r.o. patří mezi jednu z největších výrobních společností ve Zlínském regionu. Byla založena v roce 1931 panem Tomášem Baťou a začala se zabývat výrobou pneumatik pro osobní vozy. Od roku 1932 začala také vyrábět formy na výrobu těchto pneumatik ve své vlastní divizi výroby forem. V roce 1993 se původní Barum a.s. stala součástí koncernu Continental AG a působí na mezinárodním trhu a stala se tak jedním z největších dodavatelů osobních pneumatik na světě. Organizační struktura společnosti je rozdělena do jednotlivých divizí. Jednou z nich je divize výroby forem na osobní pneumatiky, která se stala strojírenskou součástí jinak plně gumárenské společnosti Barum Continental s.r.o. Divize vyrábí své výrobky výhradně pro koncernové zákazníky a to formy pro pláště na osobní automobily. Divize výroby forem jako součást společnosti Barum Continental je držitelem certifikátů ISO 9001 a je hodnocena podle systému řízení jakosti pro automobilový průmysl. Divize výroby forem se ještě řídí podle interních směrnic řízení jakosti se svou vlastní politikou jakosti. Divize výroby je hodnocena dodavatelskými audity každé dva roky centrálou Continental AG. Kontrolními audity jsou hodnoceni všichni dodavatelé forem pro koncern Continental. Dnes je VFB strojírenským závodem, který patří mezi světovou špičku ve výrobě osobních segmentových forem. [8]

Formy, které v současné době Divize výroby forem vyrábí, jsou výsledkem důsledné a pečlivé práce, na níž se podílí vysoce kvalifikovaný tým odborníků. Celý proces je zpracováván vysoce výkonnou počítačovou podporou systémů UNIGRAPHICS, DESIGNCAD a dalších softwarových produktů.

Nejdůležitějším technologickým centrem je výroba modelů a hliníkových odlitků. Modely jsou vyráběny na NC pětiosých frézkách, odlévání probíhá v ochranné atmosféře. Odlitky dosahují špičkové kvality a přesnosti.

Obráběcí a dokončovací operace provádí kvalifikovaní pracovníci na moderních technologických zařízeních, jehož páteř tvoří CNC stroje – frézky, soustruhy, vrtačky a gravírovací stroje. Kvalita forem je zajišťována v průběhu celého výrobního procesu a prakticky sto-percentní kontrolou hotového výrobku.

3.1.1 Konstrukce forem a výroba

Každá segmentová forma pro osobní pneu sestává z těchto hlavních dílů:

- dezénové segmenty
- bočnice
- patkové kroužky

Tyto jednotlivé díly se vkládají do kontejneru, který zajišťuje jednak vytápění formy tak i pohyb formy při vkládání a vyjímání pneu při lisování.

Dezénové segmenty

Dezénové segmenty se vyrábí z hliníkových odlitků z materiálu AlMg₃. V oddělení slévárny se podle výkresů a CNC dat vyrábí na pětiosých frézkách modely, které mají prakticky vzhled budoucího dezénu pneu. Pomocí speciálních gumových otisků s vysokou rozměrovou pamětí a po vložení ocelových lamel se ze sádry zhotoví odlévací forma. Tato forma stejně jako prvotní model se ručně dokončuje, aby se odstranily drobné vady a nerovnosti na povrchu. Vše je zaměřeno na vysokou rozměrovou přesnost licí sádrové formy. Odlití roztaveného hliníku ukončí základní výrobní proces ve slévárně.

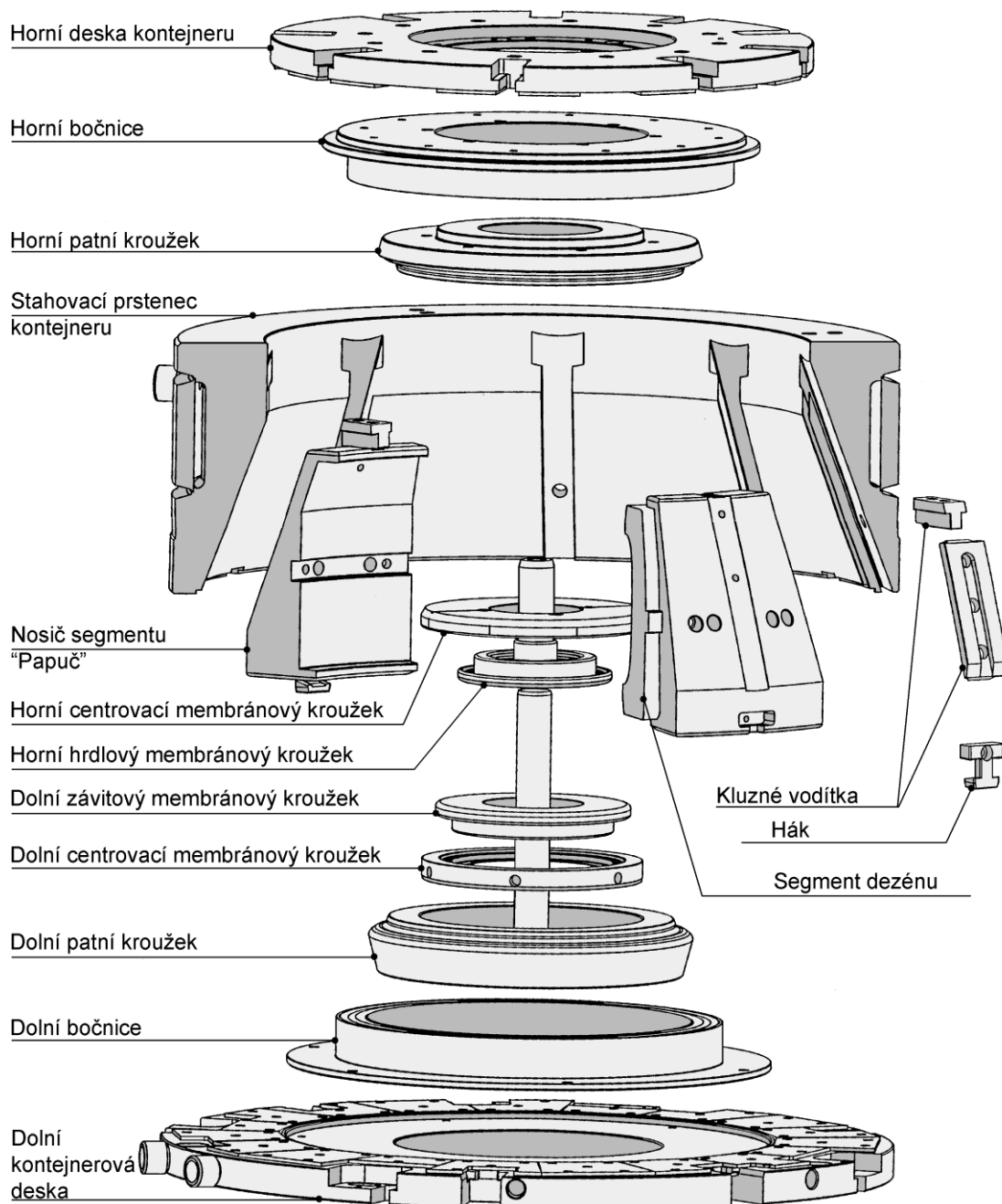
Odlité dezénové segmenty se dále soustruží a frézují, aby rozměrově pasovaly do lisovacího kontejneru. Velmi náročnou a přesnou výrobní operací je zhotovení odvzdušnění dezénů. V dezénovém kruhu se musí vyvrtat až tisíce otvorů pro speciální euroventily, aby bylo zaručeno správné odvzdušnění formy při lisování pneu. Spolu s odvzdušněním se na dezénu provádí i ruční dokončení odlitku, zejména odškrábání přetoků a vad vzniklých v průběhu lití a následném vychládnutí hliníku.

Bočnice

Bočnice se soustruží z ocelových vypálených polotovarů. Po tepelném zpracování a vysoustružení základního tvaru bočnice se do profilu pneu frézují drážky pro výměnné štítky popisu. Po vsazení a dolícování výměnných štítků se na lisovací části bočnice vyfrézuje popis, který se při lisování pneu otiskne na finální výrobek – plášť pneu. Na popisu jsou uvedeny veškeré identifikační znaky pneumatiky, které umožní jednoznačné určení typu výrobku a podmínky jeho používání, výrobce pneumatiky i výrobce formy. Stejně jako v dezénové části formy, tak i na bočnici se musí zhotovit odvzdušňovací systém, který zaručí správné odvzdušnění formy při lisování pneu. Spolu s odvzdušněním se na bočnici ručně dokončí nerovnosti a chybějící detaily vzniklé po strojním obrábění.

Patkové kroužky

Patkové kroužky se po tepelném zpracování soustruží z ocelových vypálených polotovarů. Po soustružení základního tvaru se na lisovací části kroužků vrtá a frézuje odvodušňovací systém, který zaručí správné odvodušňení formy při lisování pneu. Stejně jako na bočnicích a dezénových segmentech se pro odvodušňení používají i speciální euroventily, které při lisování pneu zabraňují zátékání gummy do formy, ale umožňují odvodušňení formy.



Obrázek 12 Pohled na sestavu formy na lisování pneumatik pro osobní automobily [8]

Jak názorně ukazuje obrázek č. 10 je segmentová forma společně s bočnicemi, patkovými kroužky a kontejnerem složitá soustava dílů vyrobených různými technologiemi ve veliké přesnosti.

Předmětem praktické části této bakalářské práce je měření přesnosti dutiny forma a proto se zaměříme na odlévané dezénové segmenty formy na lisování pneumatik pro osobní automobily. V následujících kapitolách popíšeme původní technologii tvarové optimalizace segmentů – ruční optimalizaci a novou technologii – strojní optimalizaci za pomoci multi-senzorového souřadnicového měřicí stroje Werth včetně přenosu souřadného systému pomocí upínače Erowa na CNC frézku Fidia.

3.2 Ruční zaměření segmentů

Ruční zaměření segmentu formy (ruční optimalizace) spočívá v ustavení jednotlivých segmentů do kruhu o daném výkresovém průměru a stanovené výkresové výšce na optimalizační desku pomocí šroubů a upínacích kostek. Měření se provádí pomocí výškoměru s integrovaným úchylkoměrem.

Za pomoci optimalizačního výškoměru s integrovaným úchylkoměrem se zaměří jednotlivé segmenty. Po vyvrtání upínacích otvorů dojde k přeměření jednotlivých segmentů a jejich přesnému ustavení na správný průměr a výšku segmentu. Ustavené segmenty jsou upnuty pomocí šroubů na optimalizační desku. Při ustavování segmentů na optimalizační desku je kladen důraz na ovalitu a konicitu segmentu. Případné deformace vzniklé při odlévání segmentů (odlévají se segmenty pohromadě – v kruhu je celá forma s přídávky na obrábění) je taktéž započítána a zapsána do PC, které pomocí speciálního softwaru přepočítá úchyly tvaru a vyznačí případné korekce na jednotlivých segmentech. Software také zohledňuje požadavek výroby na eliminaci navařování segmentů vysunutím segmentů o velikost propadlého pole. Po závěrečném kontrolním měření jsou segmenty připraveny k dalším operacím dle technologického postupu. Výstupem po ručním zaměření segmentů je protokol, který slouží dalším pracovníkům k opravě povrchu segmentu.

Ruční zaměření segmentů je časově náročné. Výše uvedený postup trvá 15 hodin, což jsou 2 směny na jednu formu. Při denním požadavku na optimalizaci 5 forem je nutné vybavit 5 pracovišť na dvousměnný provoz.

Přesnost ručního zaměření segmentů je do 0,20 mm.



Obrázek 13 Ruční zaměření segmentů [vlastní]

3.3 Strojní zaměření segmentů

Strojní zaměření segmentu formy (strojní optimalizace) spočívá v zaměření souřadného systému jednotlivého segmentu multisenzorovým souřadnicovým měřicím strojem Werth a přenosem tohoto naměřeného souřadného systému včetně NC programů pro 5.osou frézku Fidia G996.

Jednotlivý segment se upne pomocí šroubů k upínací paletě Erowa. Na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji Werth i na 5.osé frézce Fidia G996 je identický pneumatický upínač Erowa. Tento systém švýcarského výrobce Erowa umožňuje opakované upnutí segmentů na upínací paletě s odchylkou max. 0,002 mm vůči upínači. Systém využívá

přesných dosedacích ploch a kostek, které umožňují dosažení této přesnosti upnutí. Upínací systém je natolik tuhý, že umožňuje HSC obrábění.

K zaměření segmentu multisenzorovým souřadnicovým měřicím strojem Werth dochází pomocí poloautomatického programu. Na počátku programu se stanoví, že výsledný souřadný systém bude vztažen k upínači Erowa. Poté se nahraje 3D CAD model skořepiny daného tvaru dutiny formy určeného ke strojní optimalizaci. Po spuštění programu se pomocí ručního ovládání zaměří segment formy v ose X a Z pomocí optického senzoru Werth Zoom a osa Y dotykovou sondou. Z důvodu zpřesnění měření měřicí stroj zopakuje v automatickém režimu zaměření jednotlivých os. Po zaměření souřadného systému segmentu následuje skenování v automatickém režimu pomocí LLP laserové sondy. Naskenovaný povrch v pěti měřicích stopách je porovnán s 3D CAD modelem a případné odchylky naměřeného tvaru od 3D CAD modelu jsou v jednotlivých stopách graficky znázorněny barevnou mapou. Součástí výstupu je také protokol o naměřených hodnotách včetně odchylek kruhovitosti jednotlivých stop.

Aby se předešlo navařování propadlých polí ve skenované měřicí stopě optimalizovaných segmentů je do programu implementována dodatečná funkce Best-Fit, která naměřené data posune (ofsetuje) pouze v ose Z o maximální hodnotu naměřeného propadlého pole. Tato funkce je dle zkušeností z ruční optimalizace limitována v rozsahu +0,1 mm -0,3 mm.

Hlavním výstupem z měření na multisenzorovém měřicím stroji Werth je souřadný systém zaměřeného segmentu stanoveném vůči upínači Erowa.

Pomocí transformačního programu je přepočítán naměřený souřadný systém vůči ideální nule (jeho posunutí v osách X, Y, Z), a jsou generovány NC programy pro 5. osou frézku Fidia G966. Tyto programy jsou pomocí LAN sítě přeneseny do 5. osé frézky Fidia G966, kde je provedeno postupné obrábění dle technologického postupu.

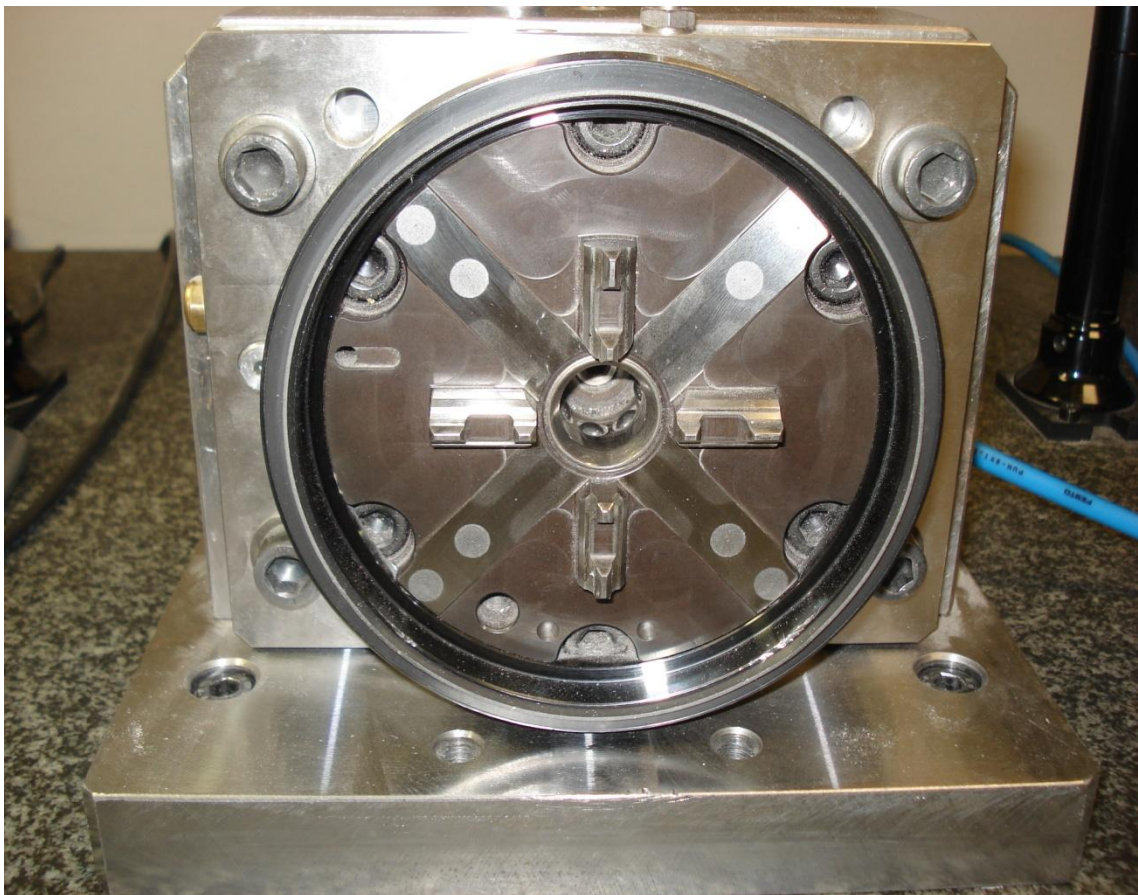
Strojní zaměření segmentů je časově méně náročné než ruční zaměření segmentů. Strojní zaměření segmentů trvá dle složitosti formy (letní nebo zimní dezén s několika tisíci lamelami) 4,5 až 8 hodin, což je 3 až 5 forem při třísměnném provozu. Při denním požadavku na optimalizaci 5 forem je nutné ponechat 2 pracoviště a 4 operátory ruční optimalizace na dvousměnný provoz.

Přesnost strojního zaměření segmentů je menší než ruční zaměření z důvodu absence in-vence obsluhy ručního zaměření. Měřicí stroj je přesný pouze tak, jak je zkonstruován a naprogramován a pokud se objeví nějaká anomálie při měření (atypická chyba ve tvaru

odlévaného segmentu formy, která není podchycena ve vyhodnovacím software měřícího stroje) dochází k odfiltrování naměřených dat, kdežto operátor u ruční optimalizace tuto atypickou vadu zohlední v ustavení segmentu. I tak je přesnost strojního zaměření segmentu do 0,30 mm.

Hlavním přínosem strojní optimalizace segmentů formy je frézování na jedno upnutí na jediném stroji. Při upnutí do 5.osé frézky Fidia G996 jsou frézovány všechny tvarové plochy mimo upínací, vrtány otvory a řezány závity na upnutí do kontejneru. Po ofrézování všech segmentů formy jsou segmenty upnuty šrouby na upínací desku a postupným skládáním vedle sebe do kruhu lze ihned korigovat výslednou spáru mezi všemi ofrézovanými segmenty. Díky upínacímu systému Erowa lze případné korekce velmi jednoduše provést bez ztráty přesnosti.

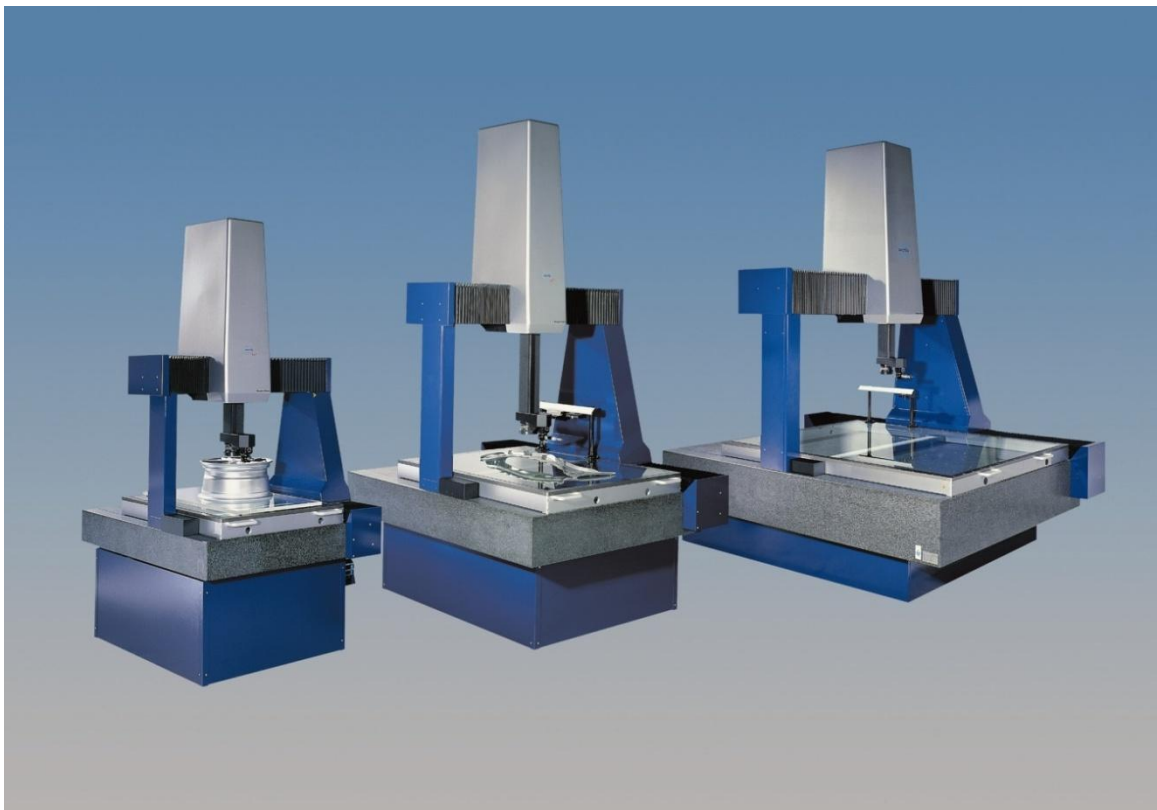
Při použití technologie ručního zaměření segmentů je nutné použití dvou typů vrtaček a 4.osé frézky. Obráběcí operace se provádí na více upnutí. Tato skutečnost zvětšuje nejistotu měření a prodražuje výrobní proces. Další nevýhodou je potřeba více pracovníků a výrazně větší logistická náročnost výrobního procesu.



Obrázek 14 Upínací systém Erowa [vlastní]

3.4 Multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth

K měření přesnosti desénových segmentů se používá multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth Scope-Check MB 3D CNC, který je výrobkem německého výrobce Werth Messtechnik GmbH. Tento stroj byl vyvinut pro hospodárné zajištění jakosti v dílenském prostředí – především v nástrojárnách a lisovnách plastů. Mechanický design byl koncipován jako pevná mostová konstrukce, kde na pinole přístroje jsou umístěny měřicí senzory. Přesné vedení hlavních měřících os je založeno na systému separace osy X od osy Y a Z. Měřicí rozsah je 650x750x500mm.



Obrázek 15 Portálový měřicí stroj s pohyblivým mostem Werth Scope-Check MB 3D CNC, různé velikosti strojů [1]

Ústředním senzorem multisenzorového souřadnicového 3D měřicího stroje Werth SCOPE-CHECK MB je optický senzor pro zpracování obrazu, jenž zahrnuje patentovanou optiku Werth Zoom s 25 krokým zoomem. Tento patent firmy Werth umožňuje nastavení zvětšení obrazu (zoom), tak i nastavení pracovní vzdálenosti optiky v rozsahu 20 až 220mm (oproti standardní optice, kde je pracovní vzdálenost konstantní), při zvětšení obrazu 0,5x až 5,0x. Optika přístroje je plně 3D, kdy Z-souřadnice prvku se získává metodou tzv. autofokusu.

Přístroj „přeostří“ povrch dílu, získá histogram ostrosti obrazu, a nejvíce kontrastní obraz obraz vyhodnotí jako měřený bod. Pro správné nasvícení měřeného dílu se využívají dva typy horního osvitu (červené světlo - osvit kruhy LED diod, kdy jsou kruhy osvitu rozdělené na 4 kvadranty po 90°), a osvit průchozí skrze objektiv – bílé světlo. Každý druh osvětlení je určen pro jiné materiály, např. pro hliník se využívá červeného světla.

Dotekovým senzorem tohoto přístroje je také scannovací doteková sonda Renishaw SP25, která dokáže kontinuálně scannovat měřený díl. Sonda je disponována na motoricky indexovatelné sensorové hlavě Renishaw PH10 – 2M.

Senzor LLP (Laser Line Probe) – plošný liniový laser je kompaktní snímač, využívající princip triangulace. Je určený hlavně pro digitalizaci složitých obecných ploch, hlavně plastových dílů, kde není vyžadována vysoká přesnost měření (nejistota senzoru < 50µm). Rychlá digitalizace dílů je možná i na vysoce lesklém povrchu, či nízké kontrastním. Délka měřicího paprsku může být až 15 mm, při pracovní vzdálenosti 75 mm. Naměřené body lze porovnat vůči nominálním hodnotám 3D CAD modelu. [3]

3.5 CNC frézka Fidia G966

CNC 5.osá frézka Fidia G996 je vysokorychlostní obráběcí centrum vyvinuté a vyráběné italskou firmou FIDIA S.p.A. pro splnění požadavků výrobců forem, zápusťek a modelů. Stroj je primárně určen pro různé typy obrábění:

- Třírozměrné vysokorychlostní obrábění
- Snímání modelu se zaznamenáním dráhy nástroje
- Měření

Stroj je portálové konstrukce s otočně naklápěcím stolem. Lože je zhotovené z šedé litiny G30, pohyby v osách X, Y a Z provádějí suporty zhotovené ze sféroidní litiny GS600. Pohyb os zajišťují kuličkové šrouby poháněné bezkartáčovými motory. Osy X a Y mají přímé spřažení motor-kuličkový šroub, osu Z pohání ozubený řemen. Stroj je ještě vybaven lineární naklápěcí osou C a lineární otočnou osou A. Pohony jsou digitálně ovládané a umožňují rozsáhlou kapacitu seřizovacích parametrů, jakož i značnou stabilitu regulace. Vysoce dynamické motory jsou bezkartáčové a pracují se střídavým proudem. Osy se pohybují na

vedeních s lineárními valivými hnízdy. Odměrování polohy os je přímé prostřednictvím snímačů optických měřitek. Snímače jsou zapouzďeny a chráněny proti prachu a kapalině.

Pro zamezení tepelného kolísání a tím zajištění maximální přesnosti jsou hlavní zdroje tepla (matice šroubů, držáky motorů a vřeteno) izolovány od konstrukce použitím výměníků tepla s cirkulací kapaliny s konstantní teplotou.

Pracovní stůl z litiny G30 je pevně spojen s ložem obráběcího stroje, pracovní plocha stolu má T drážky pro upnutí obráběných dílců nebo jako v našem případě upínače Erowa.

Dále je CNC frézka opatřena automatickým výměníkem nástrojů, automatickým sběračem třísek s dopravním pásem a měřicím zařízením s laserovým snímačem.

Tato obráběcí centra jsou výsledkem mnohaletého výzkumu a ověřování u nejvýznamnějších výrobců forem a nástrojů. Vysoké rychlosti otáčení vřetene (maximální otáčky vřetene jsou 24000 ot/min) a vysoké rychlosti posuvů (maximální rychlost posuvu je 45m/min), jakož i vysoká zrychlení v kombinaci se složitými algoritmy CNC řídicího systému FIDIA významně snižují tradiční časy obrábění. [9]

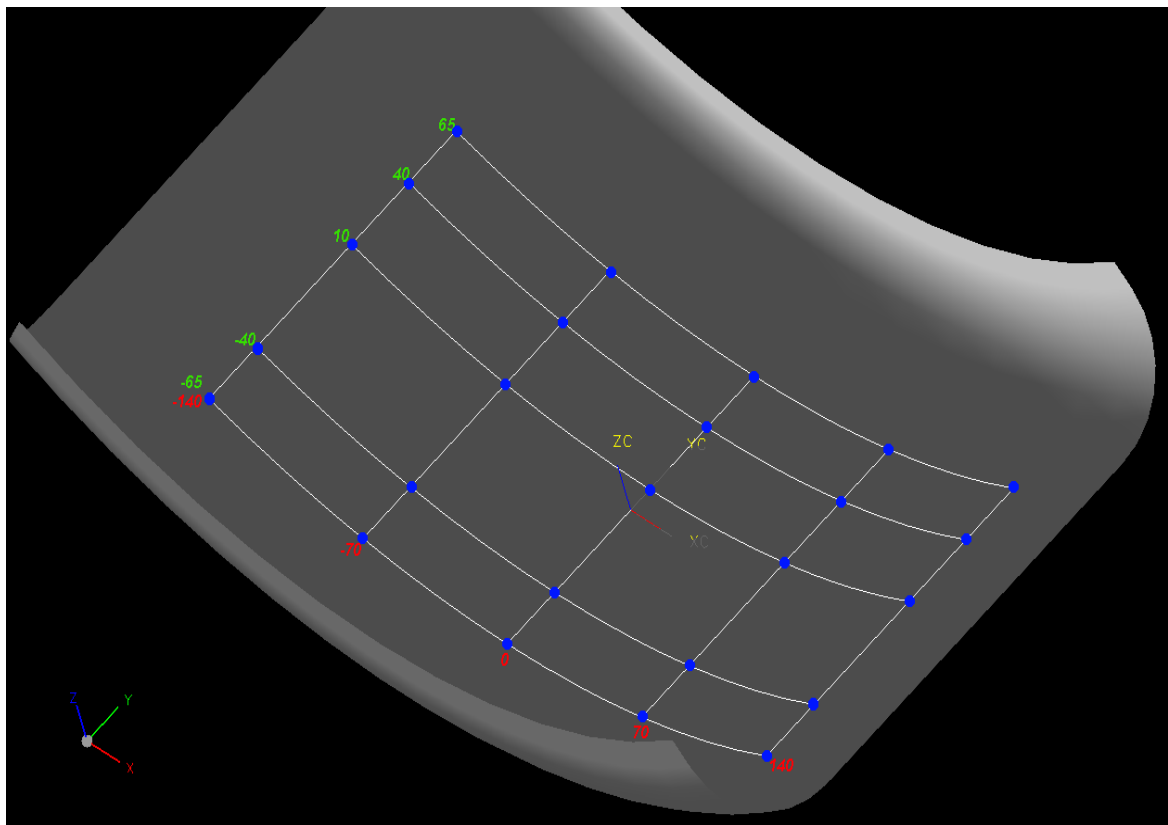


Obrázek 16 CNC frézka Fidia G996 [vlastní]

4 MĚŘENÍ PŘESNOSTI DUTINY FORMY

4.1 Specifikace měřeného tvaru

V praktické části bakalářské práce se budeme zabývat měřením přesnosti dutiny formy. K měření byl vybrán zkušební segment, který má tvar válce. Zkušební segment byl vyfrézován s přídavkem na smrštění 1,7%. Pro měření bylo odlito 10 segmentů z hliníku AlMg₃. I když má drtivá většina lisovacích forem pro výrobu osobních pneumatik profil nepravidelný (sestavá se z různě velkých rádiusů napojených na sebe obloukovými křivkami) byl tvar válce záměrně vybrán z důvodu jednoduchého pravidelného geometrického tvaru. Pro vyhodnocení byla vytvořena ve válcové části zkušebního segmentu síť bodů (viz obr. 17), kde jsou pevně stanoveny souřadnice v osách X a Y. Hodnota v ose Z je odměřena v programu UNIGRAPHICS na vytvořeném 3D CAD modelu vůči rovině XY procházející počátkem souřadného systému. Vzhledem k přesnosti výsledků a přesnosti měřicího stroje jsou výsledky měření ponechány na čtyři desetinná místa.



Obrázek 17 CAD model se sítí měřených bodů [zdroj vlastní]

4.2 Způsob měření zkušebního segmentu

Jednotlivé odlitky zkušebního segmentu byly po upnutí do upínacího systému Erowa zaměřeny multisenzorovým souřadnicovým měřicím strojem Werth Scope-Check. Pro zjištění hodnoty v ose Z bylo použito Autofokusu Werth Zoom se zvětšením 42x. V níže uvedené tabulce jsou naměřené hodnoty v ose Z k daným souřadnicím os X a Y.

1. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	-0,0156	0,0014	-0,0711	-0,0171	-0,0014
40	-0,0169	-0,0177	-0,0785	-0,0318	-0,0181
10	0,0214	-0,0310	-0,0903	-0,0395	-0,0268
-40	0,0615	-0,0318	-0,1157	-0,0293	0,0184
-65	0,0471	-0,0106	-0,0857	-0,0025	0,0277

2. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0051	-0,0023	-0,0715	-0,0183	-0,0210
40	-0,0039	-0,0365	-0,0987	-0,0550	-0,0239
10	-0,0168	-0,0475	-0,0895	-0,0717	-0,0175
-40	0,0137	-0,0598	-0,1096	-0,0315	0,0055
-65	0,0704	-0,0192	-0,0834	0,0133	0,0516

3. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0213	-0,0092	-0,1103	-0,0743	-0,0687
40	0,0101	-0,0121	-0,0985	-0,0644	-0,0454
10	0,0128	-0,0193	-0,0735	-0,0272	-0,0322
-40	-0,0109	-0,0346	-0,0824	-0,0168	-0,0216
-65	-0,0237	-0,0398	-0,1047	-0,0234	-0,0238

4. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0269	0,0023	-0,0885	-0,0557	-0,0246
40	0,0154	-0,0070	-0,0773	-0,0643	-0,0103
10	-0,0131	-0,0425	-0,0604	-0,0571	0,0238
-40	-0,0083	-0,0455	-0,0802	-0,0224	0,0611
-65	0,0156	-0,0433	-0,0647	0,0210	0,0797

5. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	-0,0305	0,0148	-0,0674	-0,0412	-0,0480
40	-0,0217	-0,0058	-0,0725	-0,0343	-0,0252
10	-0,0155	-0,0306	-0,0816	-0,0329	-0,0194
-40	-0,0015	-0,0495	-0,1054	0,0034	0,0532
-65	0,0064	-0,0304	-0,0805	0,0409	0,0877

6. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	-0,0236	-0,0253	-0,0659	-0,0555	-0,0878
40	-0,0444	-0,0088	-0,0483	-0,0375	-0,0849
10	-0,0090	-0,0201	-0,0307	-0,0131	-0,0775
-40	-0,0102	-0,0307	-0,0720	-0,0238	-0,0598
-65	0,0052	-0,0308	-0,0964	-0,0287	-0,0671

7. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0580	0,0081	-0,0715	-0,0099	-0,0017
40	0,0735	-0,0071	-0,0925	-0,0384	-0,0127
10	0,0525	-0,0548	-0,1046	-0,0401	-0,0136
-40	0,0700	-0,0468	-0,1086	-0,0371	-0,0013
-65	0,0560	-0,0093	-0,0808	-0,0104	-0,0123

8. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	-0,0067	-0,0179	-0,0714	-0,0337	-0,0420
40	0,0145	-0,0256	-0,0549	-0,0301	-0,0368
10	0,0181	-0,0350	-0,0347	-0,0219	-0,0246
-40	0,0430	-0,0217	-0,0859	-0,0430	-0,0219
-65	0,0488	-0,0361	-0,1082	-0,0231	-0,0115

9. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0261	0,0227	-0,0884	-0,0334	0,0224
40	0,0289	0,0142	-0,0960	-0,0636	0,0338
10	0,0352	-0,0471	-0,0825	-0,0484	0,0358
-40	0,0086	-0,0595	-0,0989	0,0180	0,1041
-65	0,0302	-0,0043	-0,0870	0,0777	0,1113

10. odlitek

	-140	-70	0	70	140
65	0,0158	0,0185	-0,0243	-0,0258	0,0451
40	0,0236	0,0370	-0,0338	-0,0449	-0,0158
10	0,0257	0,0169	-0,0583	-0,0601	0,0226
-40	0,0108	-0,0059	-0,0611	-0,0299	-0,0222
-65	0,0207	0,0211	-0,0749	0,0114	0,0862

Tabulka 2 Naměřené hodnoty v ose Z [zdroj vlastní]

Z naměřených hodnot byly vypočítány následující údaje:

65	-140	-70	0	70	140
	0,0084	0,0016	-0,0725	-0,0361	-0,0211
	0,0069	0,0011	-0,0735	-0,0369	-0,0244
	0,0104	0,0019	-0,0715	-0,0336	-0,0228
40	0,0885	0,0480	0,0860	0,0644	0,1329
	-140	-70	0	70	140
	0,0090	-0,0065	-0,0746	-0,0462	-0,0230
	0,0069	-0,0074	-0,0756	-0,0466	-0,0248
10	0,0123	-0,0080	-0,0779	-0,0417	-0,0210
	0,1179	0,0735	0,0649	0,0326	0,1187
	-140	-70	0	70	140
	0,0117	-0,0307	-0,0700	-0,0409	-0,0118
-40	0,0106	-0,0315	-0,0712	-0,0415	-0,0140
	0,0154	-0,0330	-0,0776	-0,0398	-0,0185
	0,0693	0,0717	0,0739	0,0586	0,1133
	-140	-70	0	70	140
-65	0,0186	-0,0383	-0,0916	-0,0209	0,0139
	0,0168	-0,0389	-0,0923	-0,0216	0,0092
	0,0097	-0,0400	-0,0924	-0,0265	0,0021
	0,0809	0,0539	0,0546	0,061	0,1639
-65	-140	-70	0	70	140
	0,0285	-0,0199	-0,0865	0,0087	0,0365
	0,0269	-0,0207	-0,0868	0,0065	0,0294
	0,0254	-0,0248	-0,0846	0,0045	0,0396
	0,0941	0,0644	0,0435	0,1064	0,1784

Tabulka 3 Vyhodnocení statistických veličin [zdroj vlastní]

V tabulce 3 jsou uvedeny statistické veličiny v následujícím pořadí odshora:

$\bar{x} + Ua$ aritmetický průměr + standardní nejistota typu A

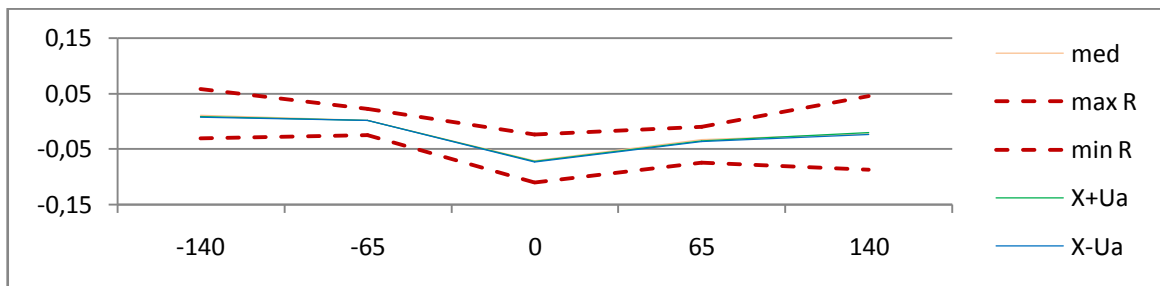
$\bar{x} - Ua$ aritmetický průměr - standardní nejistota typu A

\hat{x} - medián

R – variační rozpětí

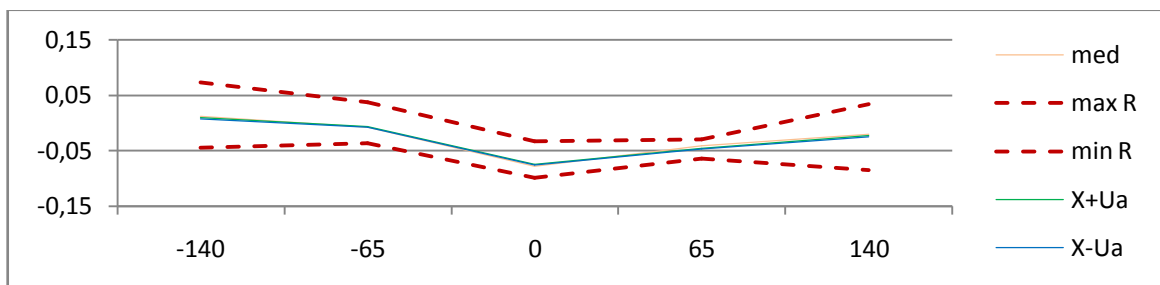
Pro názornější interpretaci výsledků byly hodnoty dosazeny do grafů. Jednotlivé grafy zvýrazňují průběh všech čtyř statistických veličin rozdělených do jednotlivých měřících obvodových stop.

Stopa 65



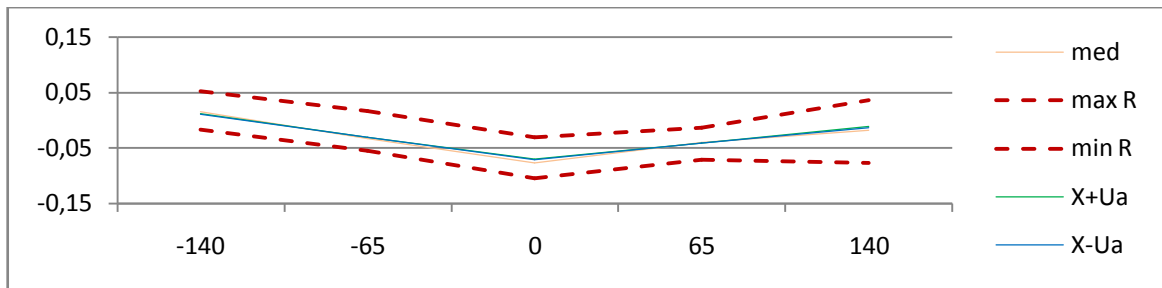
Graf 1 Statistické vyhodnocení - Stopa 65 [zdroj vlastní]

Stopa 40



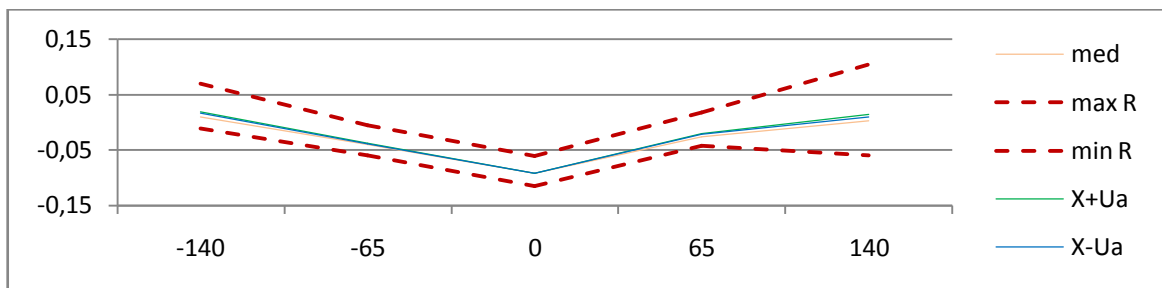
Graf 2 Statistické vyhodnocení - Stopa 40 [zdroj vlastní]

Stopa 10



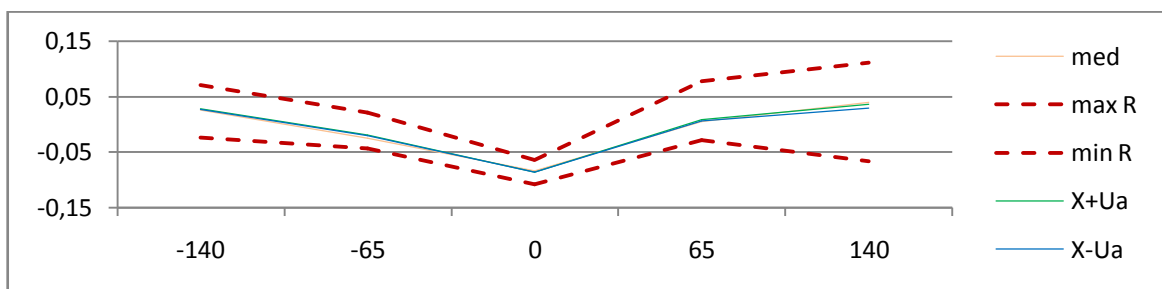
Graf 3 Statistické vyhodnocení - Stopa 10 [zdroj vlastní]

Stopa -40



Graf 4 Statistické vyhodnocení - Stopa -40 [zdroj vlastní]

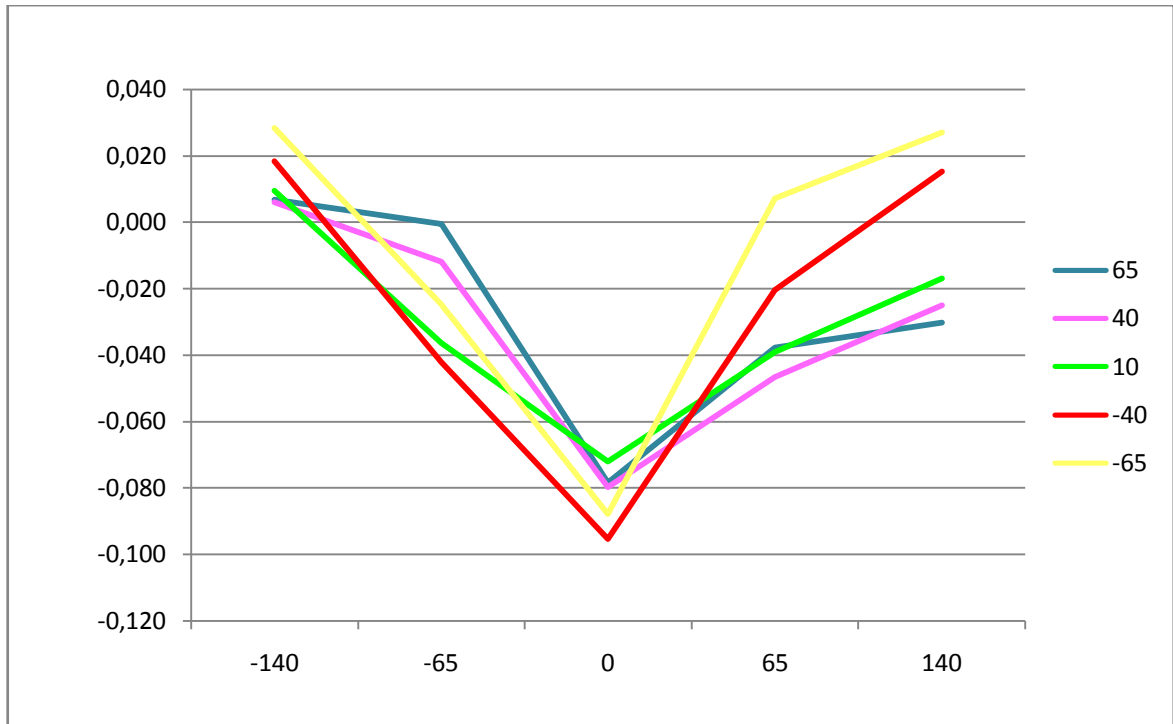
Stopa -65



Graf 5 Statistické vyhodnocení - Stopa -65 [zdroj vlastní]

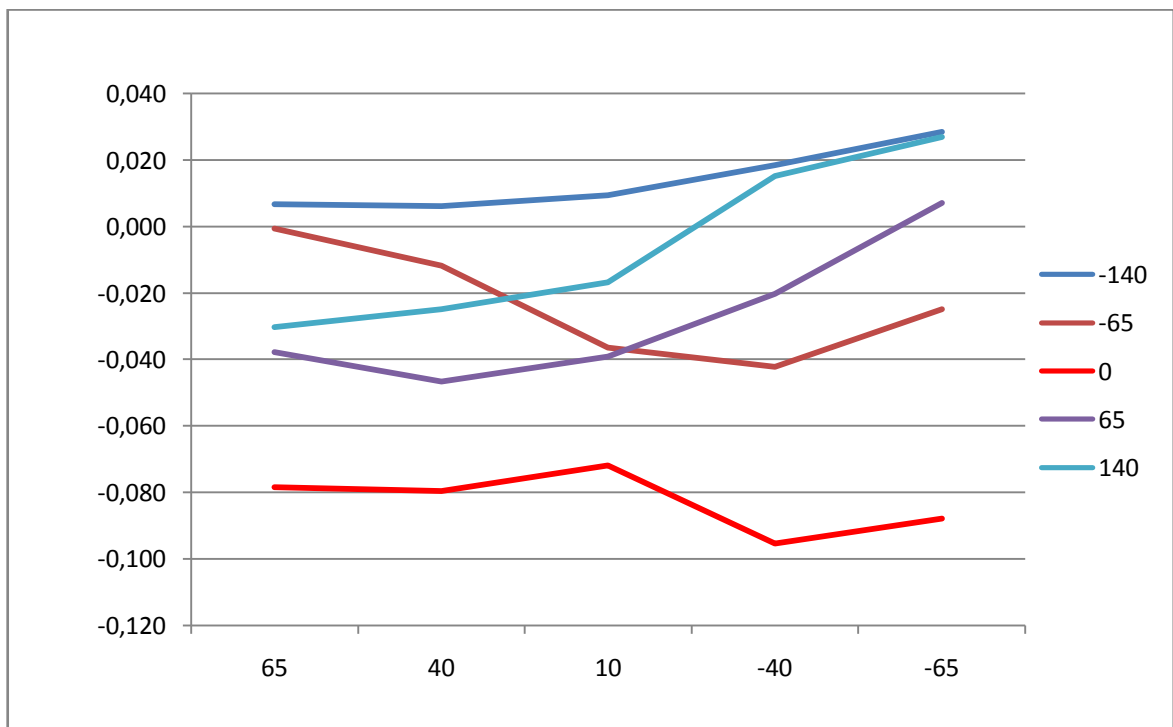
Z důvodu přesnosti a objektivnosti výsledků byla všechna měření provedena v průběhu jednoho dne, jedním operátorem, na stejnou kalibraci stroje a při konstantní teplotě 23°C. Všechny odlitky byly temperovány 12 hodin ve stejné místnosti na stejnou teplotu jako multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth.

Deformace v podélné ose



Graf 6 Deformace v podélné ose [zdroj vlastní]

Deformace v příčné ose



Graf 7 Deformace v příčné ose [zdroj vlastní]

Grafy č. 6 Deformace v podélné ose a č. 7 Deformace v příčné ose zobrazují průměrné hodnoty v dané měřicí stopě, spočteno z hodnoty aritmetického průměru všech 10 odlitků.

4.3 Vyhodnocení výsledků měření

Výše uvedené měření a vyhodnocení ukázalo skutečnost, že naměřené odchylky jsou v tolerančním poli požadovaném zákazníkem ($\pm 0,15$ mm).

Ukázalo ale také skutečnost, že krajní měřené body mají vůči středovým bodům největší odchylky. Tahle odchylka vypovídá, že průměr válce není totožný s teoretickým válcem vytvořeným ve 3D CAD UNIGRAPHICS. Ukázalo se také, že zkušební segmenty ve tvaru válce byly velice vhodnou volbou. Tím, že je plocha mezi body v příčném směru tvořena přímkou, lze okamžitě z tabulek odečítat odchylky a grafy mají ideální vypovídací vizuální schopnost. Nebyla také vnesena případná deformace ve směru zakřivení profilu.

Vzhledem k tomu, že dřevěný model byl vyroben s přídavkem na smrštění 1,7%, tak nám výše provedené měření naznačuje skutečnost, že přídavek na smrštění nemá ideální hodnotu. Pro stanovení správné velikosti přídavku na smrštění hliníku AlMg₃ při odlévání je nutno provést více měření, než výše uvedených 10 a zavést více proměnných faktorů.

Při měření byla zjištěna skutečnost, že povrch odlitých segmentů není hladký a obsahuje lokální deformace. Tato skutečnost může být způsobená technologickou nekázní anebo chybným technologickým předpisem. Nekvalita povrchu může zkreslovat výsledky měření.

4.4 Cenová kalkulace měřicího stroje Werth Scope-Check MB 3D

Výše uvedená měření byla provedena na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji Werth Scope-Check MB 3D CNC. Aby tato měření mohla být provedena je měřicí stroj vybaven finančně náročnými senzory a softwarem – viz tabulka. Jako dodatek jsou také uvedeny další senzory (mikrosonda a počítačová tomografie CT) popsané v teoretické části této bakalářské práce v kapitole 2.2 Senzory pro souřadnicové měřicí stroje.

Typ senzoru	Cena senzoru	Poznámka
Základní cena stroje	90 000,- EUR	+ 25 000,- EUR program s CAD daty
Dotykový senzor	23 000,- EUR	+ 8 000,- EUR program pro skenování
Optický senzor	12 000,- EUR	+ 8 000,- EUR program pro skenování
Plošný liniový laser LLP	35 000,- EUR	+ 8 000,- EUR program pro skenování
Mikrosonda	25 000,- EUR	+ 8 000,- EUR program pro skenování
Počítačová tomografie CT	90 000,- EUR	+ 500 000,- EUR speciální stroj

Celková cena stroje Werth	209 000,- EUR	mimo Mikrosondy a CT včetně SW
---------------------------	---------------	--------------------------------

Tabulka 4 Cenová kalkulace měřicího stroje Werth Scope-Check a měřicích senzorů [3]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout souřadnicovou měřicí techniku, provést a vyhodnotit reálné měření na souřadnicovém měřicím stroji.

Teoretická část práce obsahuje popis měřicích zařízení od nejjednodušších profilprojektorů až po multisenzorové souřadnicové měřicí stroje. Dále jsou podrobně popsány používané senzory na souřadnicových měřicích strojích včetně nejnovějších CT senzorů.

V praktické části byla představena Výroba Forem Barum, dceřiná část Barum Continental, s.r.o. Podrobně popsán výrobek – segmentová forma na lisování pneumatik pro osobní automobily. Dále byly popsány obě metody zaměření segmentů lisovací formy na výrobu osobních pneumatik.

V praktické části bylo provedeno měření 10 hliníkových segmentů na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji WERTH Scope-Check MB 3D CNC. Jednotlivé měření byly zapsány do tabulek a statisticky vyhodnoceny.

Ve vyhodnocení výsledků měření bylo doporučeno přezkoumání hodnoty smrštění, které bylo použito při výrobě dřevěného modelu, potřebného k odlití zkušebních segmentů.

Doporučuji stávající hodnotu smrštění 1,7% upřesnit další sérií zkoušek se stejným zkušebním segmentem ve tvaru válce a nejpoužívanějších tvarů profilů pneumatik pro osobní automobily. Dále doporučuji úpravu používané slévárenské technologie ve směru zlepšení povrchu odlitku.

Příložené CD obsahuje text bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHRISTOPH, Ralf, NEUMANN, Hans Joachim. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Uherské Hradiště: L.V.Print, 2008. 106 s.
- [2] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: Technická univerzita, 1999. 76 s. ISBN 80-7083-326-2
- [3] *Firemní prezentace firmy Prima Bilavčík s. r. o.* [online]. [2009] [cit. 2009-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.merici-pristroje.cz/>>.
- [4] *Firemní prezentace firmy Mahr* [online]. [2010] [cit. 2010-19-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.microtes.cz/Mahr/vision3D-Ma.pdf>>
- [5] Jemná mechanika a optika, Vědecko-technický časopis, 2007/5 Dostupný z WWW: <<http://jmo.fzu.cz/2007/Jmo-05/JMO-200705.pdf>>
- [6] ĎAĎO S. – KREIDL, M. 2000. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [7] HOFFMAN, D. *Priemyselná meracia technika*. Bratislava: Alfa, 1988, 586 s., 246tab. ISBN 80-05-00139-8
- [8] Barum Continental spol. s r.o. *Gumárenská technologie – učební texty*. Otrokovice, 2008, 82 s. Dostupný na intranetu Barum Continental spol. s r.o. [cit. 2010-19-04].
- [8] HAASZ, V. – ROZTOČIL, J. – NOVÁK J. 2000. *Číslicové měřicí systémy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 315 s. ISBN 80-01-02219-6.
- [9] FIDIA S.p.A. *Návod k obsluze HSC obráběcí centra Fidia G966*. Padova - ITALY, 2006, 352 s.
- [10] PERNIKÁŘ, Jiří, TYKAL, Miroslav. *Strojírenská metrologie II*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD	Computer-Aided Design.
3D	Three Dimensional.
CNC	Computer Numerical Controlled.
CCD	Charge-Coupled Device.
Pixel	Picture Element.
Voxel	Volumetric Pixel.
SW	Software.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 Měření v obraze
- Obrázek 2 Princip konstrukce měřicího mikroskopu a měřicího projektoru s hranovým senzorem Werth
- Obrázek 3 Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřicích strojů
- Obrázek 4 Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřicích strojů
- Obrázek 5 Princip 3D měřicí hlavy
- Obrázek 6 Skenování dotykovou sondou ve 2D
- Obrázek 7 Obrysový snímač s laserovým senzorem a měnitelným rozhraním
- Obrázek 8 Měřené objekty při různých způsobech osvětlení
- Obrázek 9 Vícerozměrné senzory na měření vzdálenosti
- Obrázek 10 Multisenzorová technika
- Obrázek 11 Měření 3D povrchů s porovnáním 3D CAD
- Obrázek 12 Pohled na sestavu formy na lisování pneumatik pro osobní automobily
- Obrázek 13 Ruční zaměření segmentů
- Obrázek 14 Upínací systém Erowa
- Obrázek 15 Portálový měřicí stroj s pohyblivým Werth Scope-Check MB 3D CNC
- Obrázek 16 CNC frézka Fidia G996
- Obrázek 17 CAD model se sítí měřených bodů

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry senzorů, které ovlivňují dosažitelnou nejistotu měření

Tabulka 2 Naměřené hodnoty v ose Z

Tabulka 3 Vyhodnocení statistických veličin

Tabulka 4 Cenová kalkulace měřicího stroje Werth Scope-Check a měřících senzorů

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Statistické vyhodnocení - Stopa 65

Graf 2 Statistické vyhodnocení - Stopa 40

Graf 3 Statistické vyhodnocení - Stopa 10

Graf 4 Statistické vyhodnocení - Stopa -40

Graf 5 Statistické vyhodnocení - Stopa -65

Graf 6 Deformace v podélné ose

Graf 7 Deformace v příčné ose