

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Bakalářská práce

2020

Jan Farkaš

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

Retrofit 3D souřadnicového měřicího přístroje

Bakalářská práce

Jan Farkaš

Vedoucí práce: Petr Janoušek

Garant práce: Ing. Ladislav Ptáček, Ph.D.

České Budějovice 2020

Prohlašuji, že svoji práci jsem vypracoval/a samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne:

Podpis autora:

Farkaš, J., 2020: Retrofit 3D souřadnicového měřicího přístroje. [Retrofit of a 3D coordinate-measuring machine. Bc. Thesis, in Czech.] – 43 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá oživením nefunkčního souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo EURO C Apex 776. V teoretické části je diskutováno seznámení s principy a funkcemi 3D souřadnicových měřicích přístrojů. Praktická část se věnuje kompletní přestavbě uvedeného přístroje, jeho modernizací a znovuuvedením do reálného provozu.

Annotation

This bachelor's thesis is focused on recovering a non-functional coordinate-measuring machine Mitutoyo Euro C Apex 776. In the theoretical part we discuss the introduction of the principles and functions of 3D coordinate-measuring machines. The practical part of the thesis focuses on a complete rebuild of machine mentioned above, its modernization and reintroducing it to service.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Petru Janouškovi a garantovi práce Ing. Ladislavu Ptáčkovi za všechny cenné rady, připomínky a čas, který mi věnovali. Dále chci poděkovat společnosti KUBOUŠEK s.r.o. za možnost u nich na mé bakalářské práci pracovat a získat spoustu zajímavých zkušeností.

Obsah

1	Úvod	3
2	Souřadnicový měřicí stroj	4
2.1	Historie souřadnicových měřicích strojů	6
2.2	Základní mechanické prvky	8
2.3	Typy konstrukcí souřadnicových měřicích strojů	10
3	Princip souřadnicového měření	12
3.1	Metody měření na souřadnicovém měřicím stroji	14
3.2	Komplexní měřicí systémy	15
3.2.1	Délkové měřicí systémy	16
3.2.2	Optoelektrické měřicí systémy	18
4	Snímací systémy	20
4.1	Dotekové snímací systémy	22
4.1.1	Měřicí doteky	22
4.1.2	Typy doteků	23
4.2	Bezdotekové snímací systémy	24
Praktická část – Retrofit souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo EURO C Apex 776		
5	Popis retrofitovaného stroje	25
6	Kompletní odstrojení před uvedením do provozu a příprava na přestavbu	26
6.1	Odstrojení plechů a jejich příprava na lak, vyčištění stroje a demontáž původních ventilátorů	26
6.2	Kontrola pohonného ústrojí	28
6.3	Demontáž původní řídicí jednotky, odpojení čidel, motorů, kontrolérů a snímacího systému	29
7	Montáž nového odměřování	29
8	Osazení stroje novým řídicím a snímacím systémem	33
8.1	Připojení kontroléru UCC T5 a servozesilovače SPA3	33
8.2	Montáž hlavy PH20 pomocí navrženého montážního adaptéru	34
9	Vytvoření nové chybové mapy stroje	36
10	Akreditovaná kalibrace	38
11	Závěr	41
12	Seznam použité literatury	42
13	Seznam obrázků	42

1. Úvod

V posledních desetiletích představují souřadnicové měřicí stroje velký pokrok v oblasti měření. Byly zkonstruovány s cílem měření složitých dílů v mnoha odvětvích průmyslu, kde dnes tvoří neodmyslitelnou součást jak v sériové, tak v kusové výrobě.

Možnost zvolení počátku souřadného systému kdekoli v jejich měřicím rozsahu je jejich hlavní výhodou. K tomuto počátku se dále vyhodnocují souřadnice bodů nasnímaných měřením. Další výhodou je v porovnání s tradičními metodami měření rychlost, se kterou jsou schopny měřit a vyhodnocovat výsledky a možnost tyto výsledky ukládat v elektronické podobě a použít je například pro tvorbu protokolů nebo jejich další zpracování.

Stále se zvyšující požadavky na přesnost měřených rozměrů napomáhají k rychlému vývoji souřadnicových měřicích strojů a každých 10 až 15 let tak dochází k zvýšení přesnosti výroby o jeden stupeň IT.

V teoretické části práce bude čtenář seznámen se samotnými souřadnicovými měřicími stroji, počínaje jejich historií, typy konstrukcí, jejich vlastnostmi a využitím a základními mechanickými prvky stroje. Dále se zaměříme na princip a metody samotného měření jak s běžně používanými, tak s komplexními měřicími systémy a v neposlední řadě na snímací systémy souřadnicových měřicích strojů, jejich vlastnosti, použití, výhody a nevýhody.

V praktické části práce bude popsána přestavba vysloužilého a nefunkčního souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo EURO C Apex 776, která zahrnuje jeho osazení 5-ti osou hlavou Renishaw PH20, montáž nového odměřovacího systému včetně nových pravítek, kalibraci a vytvoření chybové mapy po jeho oživení a znovuuvedení do reálného provozu.

2. Souřadnicový měřicí stroj

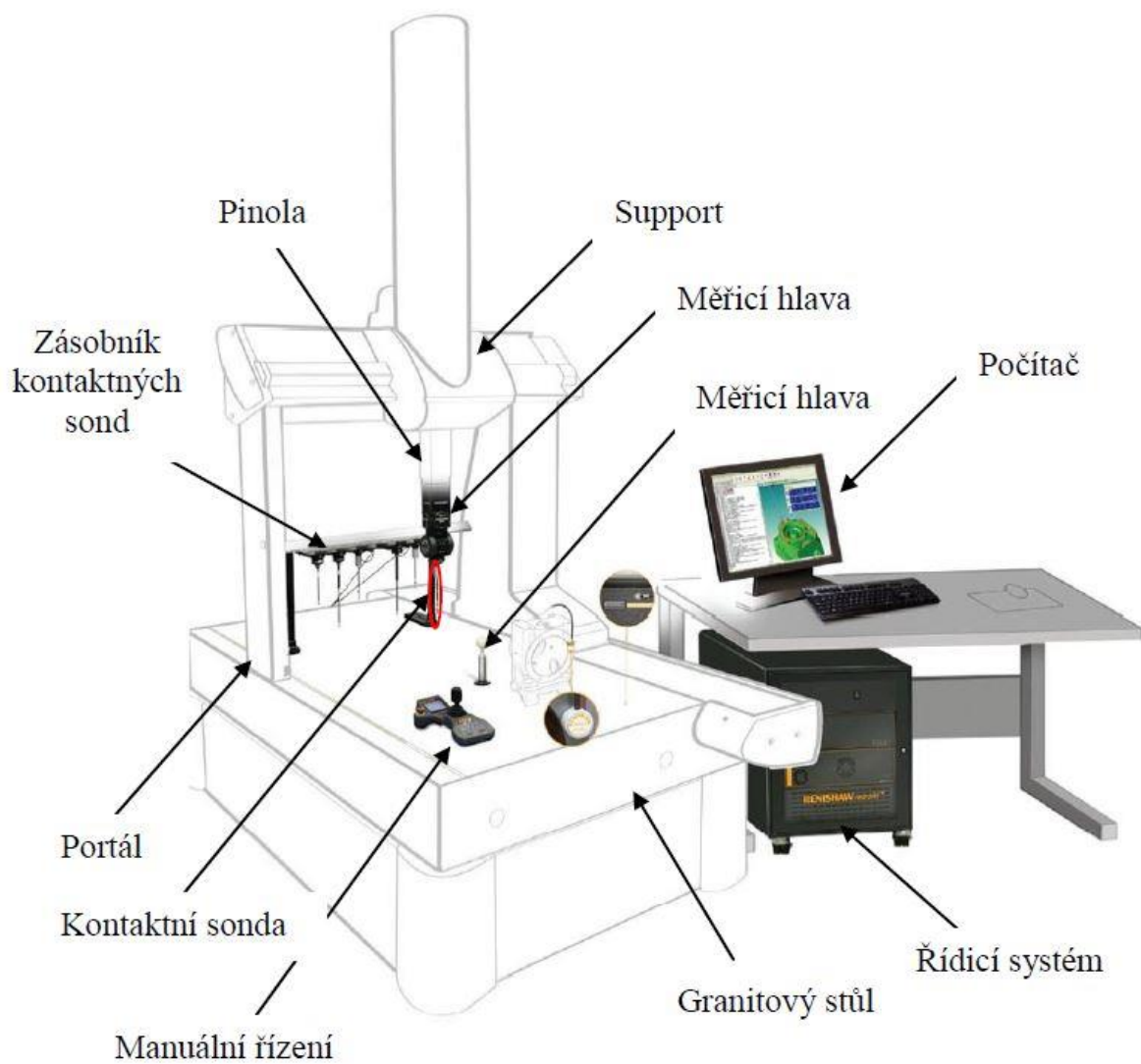
Souřadnicový měřicí stroj, též známý pod zkratkou CMM (Coordinate Measuring Machine), je v dnešní době neodmyslitelnou součástí v mnoha odvětvích průmyslu. Setkáme se s ním například v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, potravinářském průmyslu, elektronice, při výrobě plastů, papíru, ve farmaceutickém průmyslu nebo při rozvoji polovodičových součástek. Jeho obrovskou výhodou je univerzálnost a flexibilita a díky tomu patří mezi nejrychleji se vyvíjející měřicí prostředky. Díky své flexibilitě a rychlosti umožňuje CMM velmi přesnou kontrolu jak jednoduchých, tak tvarově složitých výrobků. Tím výrazně přispívá k zabezpečení kvality výroby a konkurenceschopnosti měřených výrobků. Kromě strojírenské výroby najde uplatnění i jako laboratorní zařízení. Dokáže rychle a přesně zachytit data a následně je vyhodnotit. Možnost použití jak kontaktních, tak bezkontaktních měřicích sond v kombinaci se schopností použití počítačů pro zpracování naměřených dat dělá z CMM velmi praktické a efektivní řešení v oblastech měření. [1]

Princip měření spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru, vůči kterému je vyhodnocována poloha dalších bodů, které měříme. Poloha těchto bodů je vyjádřena ve formě souřadnicových rozměrů v kartézské soustavě souřadnic, která má 3 osy: X, Y, Z. Možnosti určení základního bodu kdekoliv v měřicím prostoru stroje je velkou výhodou oproti jiným měřicím metodám. Stejně tak je výhodou vyhodnocování dat počítačem místo konvenčního způsobu odečítání naměřených hodnot ze stupnic měřidel. CMM zkracuje dobu měření o 80-90 %. [2][3]

Existuje mnoho druhů souřadnicových měřicích strojů od řady výrobců. Tyto druhy se mohou lišit ve stupni automatizace a v samotné konstrukci stroje. Stroje mohou mít různé přesnosti nebo způsob použití. Závisí také na tom, jaké jsou rozměry výrobků, které chceme na stroji měřit. [2][3]

Souřadnicový měřicí stroj se skládá z několika vzájemně propojených subsystémů:

- a) Mechanická část – Pohonný systém
- b) Odměřovací systém
- c) Snímací systém a systém pro výměnu snímačů
- d) Řídicí systém
- e) Obslužné PC
- f) Software



Obrázek 1 – Části souřadnicového měřicího přístroje [1]

Od souřadnicových měřicích strojů jsou očekávány tyto vlastnosti a funkce:

- Absolutní a inkrementální měření (po jednotlivých krocích), měření v osách x, y, z
- Měření vzdálenosti mezi dvěma definovanými body
- Určení obrysové křivky z bodů, které CMM naměří
- Generování křivek chyb
- Generování geometrických odchylek tvaru a polohy
- Automatické porovnání požadované hodnoty a hodnoty skutečné
- Kontrola sdružených součástí
- Výpočet průsečíků os
- Výpočet středů a průměrů děr (více metod)
- Zjištění sklonu osy díry
- Nalezení středu oblouku
- Automatické nastavování naměřených objektů
- Automatická korekce na dotek
- Transformace souřadnic z kartézských na polární [1]

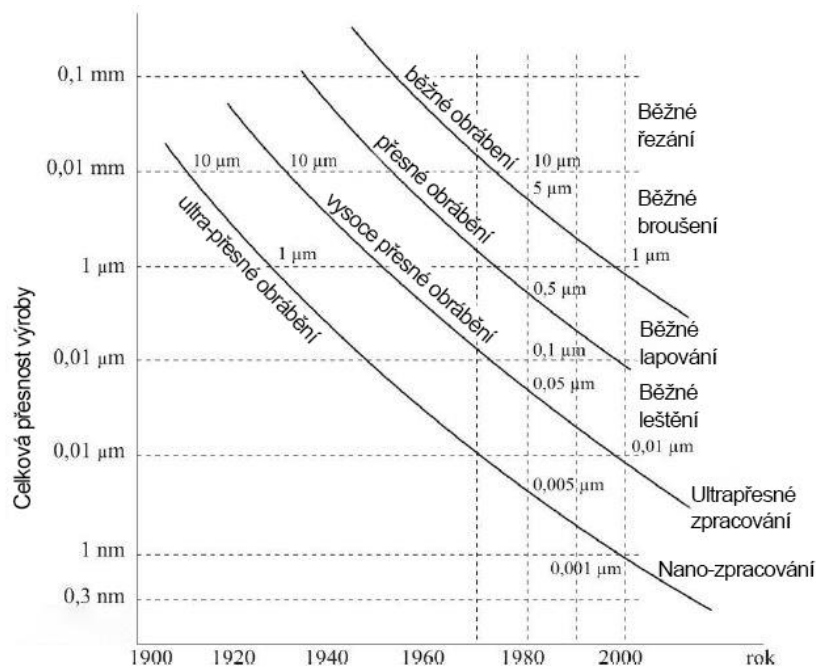
2.1 Historie souřadnicových měřicích strojů

Jeden z prvních souřadnicových měřicích strojů byl představen Skotskou firmou Ferranti roku 1959 na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Paříži. Tento stroj nabízel možnost 2D měření dílů do rozsahu 610 x 380 mm, a to s přesností 0,025 mm a rozlišením 0,012 mm.

Dnes bychom tento model nazvali manuálním souřadnicový měřicím strojem. Měřicí sonda byla ručně naváděna obsluhou do potřebných bodů měřené součásti. Vodící tyče byly navrženy tak, aby docházelo k co nejmenšímu tření, což umožnilo obsluze nastavit polohu sondy co nejpřesněji.

Klíčovou vlastností stroje bylo použití digitálních vah na osách X a Y a využití principu moiré-fringe. Po nastavení sondy do požadované polohy byly hodnoty byly zaznamenány nožním spínačem. Na stroji byl umístěn digitální odpočet ve formě znakové výbojky (digitronu). Chyběl ale velmi důležitý prvek - počítač. Na výpočet rozměrů a geometrie zde byly použity vědecké stolní kalkulačky. Podle dnešních standardů by toho měření bylo extrémně pomalé. Výpočet rozměrů dílu válcového tvaru trval déle než 20 sekund, ale i tak to bylo rychlejší než jiné, již existující metody.

I se všemi svými nedostatky a omezeními byl Ferrantiho souřadnicový měřicí stroj revolucí v oblasti metrologie. [4]



Obrázek 2 – Trendy výrobní přesnosti [1]

Schellekens roku 1998 ve svých pracích předpověděl, jak se bude vyvíjet stav přesného strojírenství. Tento vývoj je dobře viditelný na grafu (Obrázek 2). Rychlý vývoj technologie integrovaných obvodů byl jedním z důvodů dosažení současného stavu, ale nové trendy jako například počítačová technika a spotřební elektronika (pevné disky, CD a DVD přehrávače) kladou stále vyšší nároky na přesnost. S nárůstem produktů, u kterých se požaduje vysoká přesnost také narůstají požadavky na kontrolu přesnosti jejich rozměrů. Díky své univerzálnosti, flexibilitě, snadné obsluze a velmi vysoké přesnosti jsou souřadnicové měřicí stroje tou nejlepší volbou pro splnění těchto požadavků. [1]

2.2 Základní mechanické prvky

Mezi základní mechanické prvky CMM patří:

- rám
- stůl
- stojan
- portál
- most
- pinola

Rám – rám je svařovaná konstrukce s co největší tuhostí – nese všechny ostatní části mechanického systému. U mostových typů souřadnicových měřicích strojů je nahrazen deskou, která se připevňuje k podlaze. [1]

Stůl – základna, na kterou je osazena a upnuta měřená součást. Upnout ji lze přímo nebo za pomoci upínacího přípravku. [1]

Stoly jsou nejčastěji vyrobeny z přírodního kamene (žula), z umělého kamene (granit) nebo z litinového odlitku. Od těchto materiálů jsou požadovány tyto vlastnosti:

- vysoká živostnost
- objemová stálost
- minimální tepelná roztažnost
- odolnost proti korozi
- možnost opravy v případě poškození

Deska je posazena na čtyřech základních podpěrách. Horní část pracovní plochy je broušená z důvodu vysokých požadavků na rovinnost. Na pracovní ploše jsou umístěny otvory se závity, které slouží k připevnění měřeného kusu pomocí těchto závitů, šroubů nebo upínek. Na koncích desky jsou vedení, po kterých pojíždí most.

Sloupy, portály a mostové konstrukce – ve většině případů jsou konstruovány jako svařence. Je od nich požadována dostatečná tuhost a rozměrová a tvarová stálost. Portál je konstruován na minimální průhyb při pohybech pinoly při pohybu v příčném směru. U některých typů CMM je konstrukce portálu zhotovena ze žuly nebo granitu.

Most – složená uzavřená konstrukce. Jeho stojny tvoří profily normy ČSN 42 6936. Překlad mostu tvoří vedení příčných saní.

Pinola – tyč kruhového profilu, H profilu nebo čtvercového průřezu ve vertikálním nebo horizontálním provedení. Pinola v horizontálním provedení musí být opatřena vyvažovacím mechanismem pro minimalizaci chyb způsobených rozdílnou délkou vysunutí pinoly, které má za následek ohybové namáhání od vlastní hmotnosti. Na jejím konci je umístěn speciální držák pro uchycení měřicí sondy. Pinola slouží k pohybu této sondy v ose Z.

Vyrábí se z litiny, duralu, keramiky nebo přírodního kamene.

Vedení – konstrukce pohyblivých částí je konstruována tak, aby tyto části mohly lehce realizovat plynulý pohyb bez trhání a s maximální přesností i při nízkých rychlostech v koncových polohách. Je nutné, aby při pohybu na vedení docházelo k minimálnímu tření a opotřebením.

Proto se dnes už téměř nepoužívají **kluzná vedení**, která mají složitější provedení a jsou dražší. Je také nutné je neustále mazat, což vede k problému se svodem oleje, jeho těsněním a odvodem tepla. Nevýhodou je také velký odpor vedení, což umožňuje pouze malé rychlosti posuvů.

Vhodnější a častěji používané je uložení na **aerostatickém vedení**, kde se jednotlivé části pohybují po vzduchovém polštáři o tloušťce 4 až 8 μm . Je zde potlačen vliv nepřesnosti povrchu a jsme schopni dosáhnout velmi malého tření i při vysokých rychlostech a bez nutnosti maziva. Nevýhodou je možnost poškození vedení při porušení vzduchové vrstvy a snížená odolnost proti korozi. Čištění vzduchu je také obtížné.

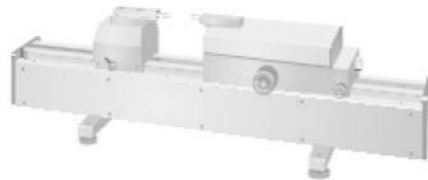
Další vhodný a často využívaný typ vedení je **vedení valivé**. Pohyb je zde zajištěn pomocí kuliček nebo válečků, které mají velmi malý valivý odpor a vysokou odolnost proti opotřebením. Výhodou je i rovnoměrnost pohybu. Přítomnost maziv zde nemá prakticky žádný vliv na přesnost pohybů a zároveň chrání proti korozi. Nejjednodušším řešením valivého pohybu jsou přesné kladky. Mezi dokonalejší provedení patří tzv. valivá hnízda, u kterých je vyloučen vliv mikronerovností a jsou vyhovující i při vysokém zatížení.

K nedostatkům patří složitost jejich přesného zhotovení.

2.3 Typy konstrukcí souřadnicových měřicích strojů

1) Jednosouřadnicové měřicí stroje [1]

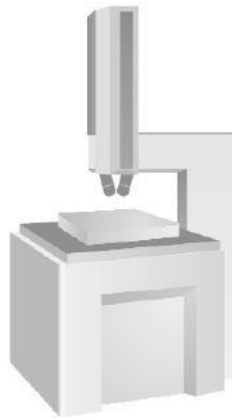
- Umožňují měření pouze v jedné ose X
- Dosahují velmi malých chyb měření – od 0,6 do 6 μm v celém rozsahu měření i při velkých rozměrech měřené součásti



Obrázek 3 – Jednosouřadnicový CMM [1]

2) Dvousouřadnicové měřicí stroje [1]

- Umožňují měření ve dvou osách (X a Y), které jsou na sebe kolmé a leží v jedné rovině
- Na 2D měření využíváme mikroskopy, profilprojektory, laserové interferometry a skenery



Obrázek 4 – Dvousouřadnicový CMM [1]

3) Třísouřadnicové měřicí stroje [1]

- Umožňují měření ve třech navzájem kolmých osách (X, Y a Z) – měření v prostoru
- Tyto stroje jsou vrcholem technologie měření geometrických veličin
- Na jedno upnutí jsme s nimi schopni provádět složitá rozměrová měření ve třech osách



Obrázek 5 – Třísouřadnicový CMM [1]

Rozdělení CMM podle jejich uspořádání (podle normy ČSN EN ISO 10360):

a) Stojanový typ [1]

- Měřený předmět je upnutý na stůl, který se pohybuje ve směru os X a Y, měřicí pinola se pohybuje ve směru osy Z. Tento typ CMM se řadí mezi nejpřesnější. Jsou vhodné pro malé rozsahy. Jejich znaky jsou tuhá úhlová konstrukce a dobrý přístup k měřenému předmětu.

b) Výložníkový typ [1]

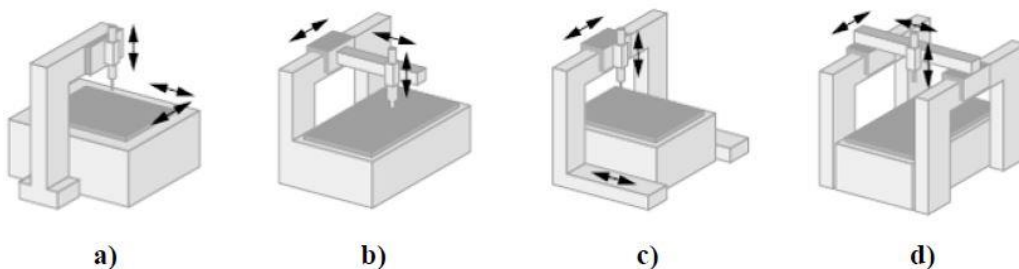
- Měřený předmět upnutý na stole, měřicí pinola se pohybuje ve směru osy Y a kolmo ve směru osy X. Vyložení pinoly se v ose Y mění, proto je nutné její vyvažování, a proto je osa Y krátká. Vhodný typ pro měření dlouhých úzkých součástí.

c) Portálový typ [1]

- Jeden z nejrozšířenějších typů CMM. Vhodný pro střední a velké rozsahy měření. Jejich vysoká tuhost umožňuje vysokou přesnost při měření.
- U tohoto typu CMM existuje verze s pohyblivým portálem nebo pevným portálem

d) Mostový typ [1]

- Tento typ má největší rozsah měření, který může být v ose X až 24 metrů. Používá se na měření nadrozměrných součástí např. v automobilovém průmyslu



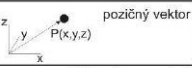

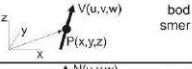

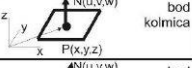

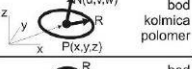

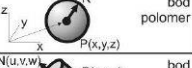

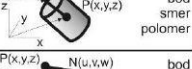

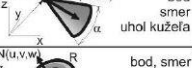

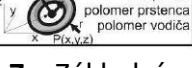

Obrázek 6 – Rozdělení CMM podle uspořádání [1]

3 Princip souřadnicového měření

Měření na souřadnicovém měřicím stroji spočívá v nasnímání bodu a určení jeho polohy v prostoru na osách X, Y a Z vůči počátku souřadnicového systému stroje.

Celý postup měření lze rozdělit do následujících bodů:

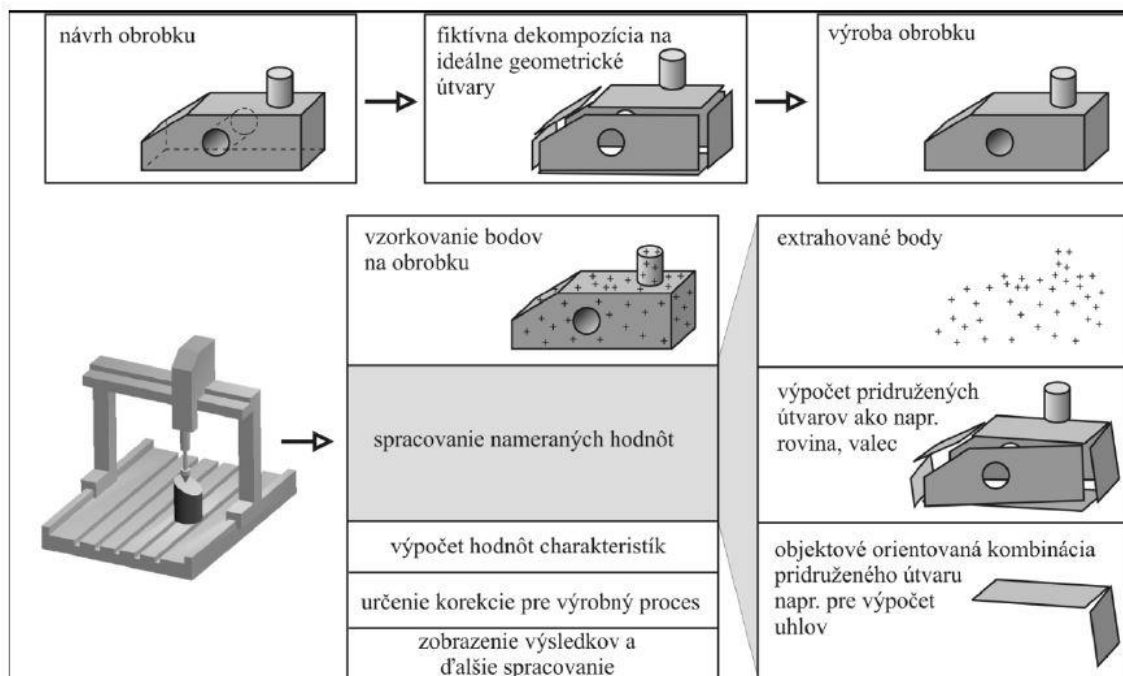
- 1) Prostudování výkresové dokumentace
- 2) Určení příslušného souřadného systému, ve kterém chceme měřit – kartézský nebo polární systém
- 3) Rozložení měřené součásti na základní geometrické elementy, kterým odpovídá minimální počet nasnímaných bodů (obrázek 7)

Útvary	Příklady a popisující parametry	Minimální počet bodů pro definování	Příklady v praxi
Bod	 poziční vektor $P(x,y,z)$	1	 roh hranola (přísečík troch pravouhlých rovin)
Přímka	 bod smer $V(u,v,w)$ $P(x,y,z)$	2	 hrana hranola (přísečík dvou pravouhlých rovin)
Rovina	 bod kolmice $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$	3	 rovina hranola
Kružnica	 bod kolmice polomer $N(u,v,w)$ R $P(x,y,z)$	3	 vzťažná kružnica dier
Gufa	 bod polomer $N(u,v,w)$ R $P(x,y,z)$	4	 upínanie privesného vozíka
Válec	 bod smer polomer $N(u,v,w)$ R $P(x,y,z)$	5	 hriadeľ
Kužel	 bod smer uhol kužela $N(u,v,w)$ R α $P(x,y,z)$	6	 upínací kužel vrtáčky
Anuloid	 bod, smer polomer prstenca polomer vodiča $N(u,v,w)$ R r $P(x,y,z)$	7	 zaoblenie na válci

Obrázek 7 – Základní geometrické elementy [1]

- 4) Návrh vhodné metody základního vyrovnání součástky (metoda 3-2-1, RPS, MPA atd.) - tyto metody odeberou měřené součásti šest stupňů volnosti
- 5) Změření vybraných geometrických elementů pro základní vyrovnání a následné aplikování jedné z výše uvedených metod vyrovnání. Po aplikaci vybrané metody se souřadný systém stroje automaticky přenesse na měřenou součást.
- 6) Změření ostatních geometrických elementů – na základě vztahů mezi změřenými elementy se dále vyhodnocují rozměry, geometrické odchylky tvaru a polohy apod.
- 7) Interpretace výsledků v měřicím protokolu

Parametry, které popisují skutečný povrch měřené součásti v ideálním tvaru jsou vypočítány pomocí softwaru z naměřených hodnot. Tyto parametry mohou být použity pro kontrolu součásti ke kontrole daného geometrického tvaru vyrobeného dílu a splnění jeho konstrukčních požadavků. (obrázek 8)

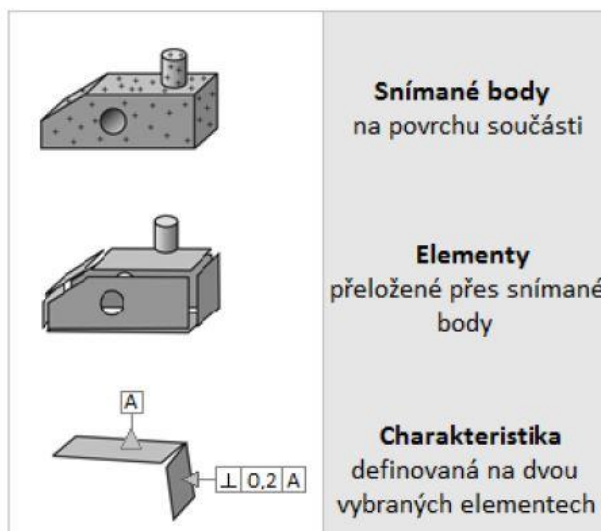


Obrázek 8 – Princip souřadnicového měření [1]

Celkové měření na CMM se odvíjí od měřicího programu, a proto je nutné pochopit jeho tvorbu.

Postup při tvorbě měřicího programu

- Každá měřená součást je složena z elementů, což jsou teoretické geometrické útvary - body, přímky, roviny, kružnice, koule a anuloidy (viz. obrázek 7) a na základě těchto elementů jsme schopni vyhodnocovat několik parametrů (charakteristik)
- **Charakteristiky** popisují **jeden element** (průměr, délka souřadnice polohy, odchylka přímosti nebo kruhovitosti apod.) nebo definují **vztah mezi elementy** jako například jejich vzdálenost, odchylku kolmosti, úhel atd.



Obrázek 9 – Definice elementů a charakteristik [1]

- Na některé elementy se může vztahovat více charakteristik. Příkladem může být kružnice, na kterou se vztahuje její průměr, souřadnice středu, odchylka kruhovitosti, souměrnost a sousost. Můžeme také definovat společnou charakteristiku pro více elementů, jako například úhel nebo odchylka kolmosti mezi dvěma rovinami.
- **Elementy** jsou v souřadnicové měřicí technice definovány jako teoretické prvky proložené přes snímací body. Například pro definování roviny potřebujeme 3 body - 9 kartézských souřadnic, přes které tuto rovinu proložíme. Některé softwary jsou v případě nasnímaní více bodů schopny proložit rovinu jako regresní prvek (např. pomocí metody nejmenších čtverců FEM). [1]

3.1 Metody měření na souřadnicovém měřicím stroji

Potřebné parametry jako jsou rozměr, tvar a poloha se při měření na CMM nepřímo získávají z naměřených kartézských souřadnic v rovině nebo v prostoru.

Přesnost hodnoty výsledné veličiny je závislá na vstupních hodnotách.

Vždy je potřeba si napřed sestavit plán průběhu měření. V tomto plánu je obsažena takzvaná strategie měření, ve které nalezneme přesně formulované předepsané požadavky na přesnost výsledků a kdy hledáme co nejlepší postup k dosažení těchto požadavků.

Operátor CMM musí být seznámen se strojem, na kterém měření provádí a s jeho možnostmi. Musí dodržovat tyto **zásady pro sestavování průběhu měření**.

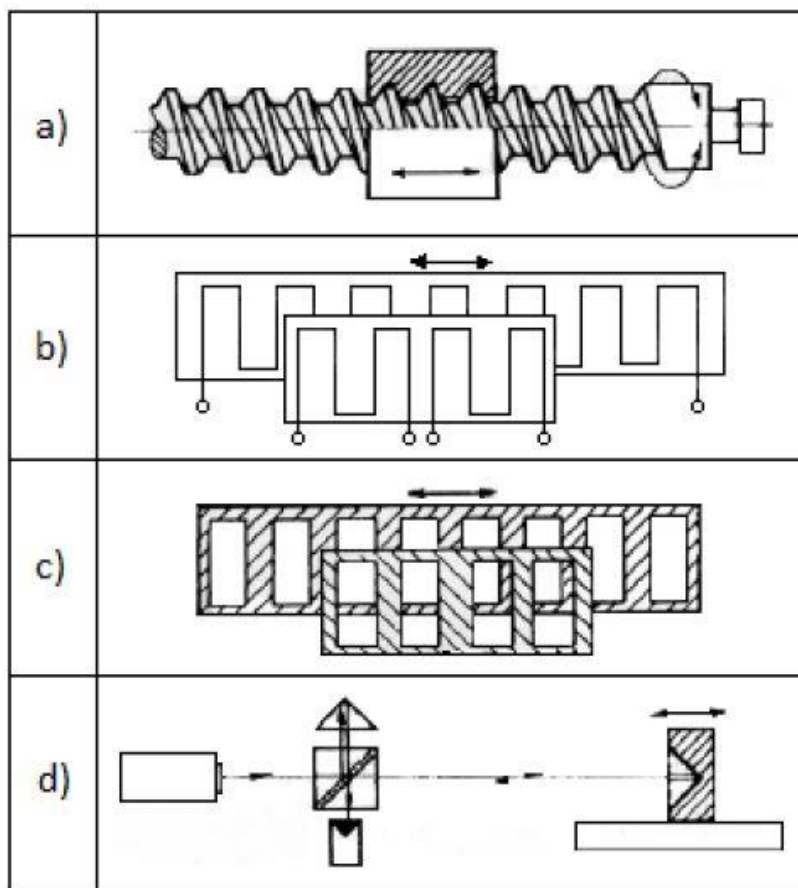
- osazení měřené součásti stabilním způsobem – na co největší plochu
- měřicí základny by měly korespondovat s konstrukčními základnami
- v co největší míře provádět slučování měřicích operací
- osazení měřené součástí tak, aby se dala proměřit v jedné poloze
- volba minimálního počtu doteků
- volba měřicích bodů tak, aby byl postup co nejkratší
- snímací body by měly být rovnoměrně rozloženy na měřeném geometrickém prvku, v nejlepším případě síťovým způsobem
- volit o 2 až 3 snímaných bodů více, než kolik vyžaduje geometrická definice
- směr pohybu snímače před dotekem by měl souhlasit se směrem jedné z os
- kruhové nebo kulové tvary je potřeba snímat diametrálně párovými dvojicemi
- při statistické interpretaci výsledků měření vyhodnotit alespoň 30 bodů
- body měřeného geometrického prvku je vhodné znázornit graficky, aby bylo možné vyloučit hrubé chyby
- vyhodnotit dosaženou nejistotu měření a porovnat ji s požadovanou hodnotou [1]

3.2 Komplexní měřicí systémy

Základem pro měření na CMM je měřicí systém, který je schopný získat souřadnice ze snímaných bodů v kartézských nebo polárních souřadnicích a tyto souřadnice dále zapsat v analogovém nebo číslicovém tvaru.

U CMM nejčastěji používáme tyto **délkové měřicí systémy**:

- Závitový hřídel s úhlovým převodníkem
- Lineární induktosyn
- Inkrementální délková stupnice
- Laserový interferometr



Obrázek 10 – Komplexní měřicí systémy [1]

a) závitový hřídel s úhlovým převodníkem; b) induktošyn; c) inkrementální délková stupnice;
d) systém s laserovým interferometrem

3.2.1 Délkové měřicí systémy

a) Závitový hřídel s úhlovým převodníkem

Vyráběn do délky 1,2 metru s malým stoupáním. Pro zajištění tepelné stability se ukládá do olejové lázně. Rozlišitelnost úhlového převodníku je 1“.

Jeho nevýhodou je chyba reverzibility, která je způsobena vůlí mezi šroubem a maticí při pohybech v opačných směrech. [1][2]

b) Induktošyn

Jedná se o fázové odměřovací zařízení, které informuje řídicí systém stroje o poloze, ve které se řízená souřadnice nachází. Rozhoduje o výsledné přesnosti číslicového řízení.

Induktošyn může být v lineárním nebo rotačním provedení.

U CMM se využívá provedení **lineární**.

Lineární induktošyn je měřítko zhotovené formou vodivého plošného spoje, který je umístěn na nevodivé fólii ve tvaru desky nebo pásky. Tato fólie je přilepena na ocelovou podložku z materiálu, který má stejný koeficient tepelné roztažnosti jako materiál stroje. Plošný spoj ve tvaru pravouhlého meandru s délkou vlny 2 mm je napájen střídavým proudem. Proti měřítku je ve vzdálenosti 0,1 mm umístěn jezdec, na kterém jsou také formou plošného spoje umístěny vedle sebe dvě smyčky stejného meandru se stoupáním 2 mm. Jejich vzájemná vzdálenost má diferencii $k/4 = 0,5$ mm. Na těchto smyčkách jsou indukována dvě napětí s fázovým posunem 90° . Při pohybu jezdce po měřítku vzniká napětí s přibližně sinusovým průběhem a jeho interpolací vychází odměřovací krok 1 μm . Při tom je provedeno rozlišení smyslu pohybu.

Výhodou induktošynu je jeho vysoká odolnost bez zvláštní údržby.

Nevýhodou je, že zvyšující se délkou měřítka roste jeho odpor a budící výkon. Nároky na jeho přesnou montáž a instalační práci jsou vysoké. Nedokonalost nalepení pásky na podložku ovlivňuje velikost vzduchové mezery, která ovlivňuje velikost a přesnost signálu. [1][2]

c) Inkrementální délková stupnice

Nejpoužívanější odměřovací systém na měření délek u souřadnicových měřicích strojů. Rozlišitelnost tohoto systému je 1 μm . Základní stupnice je umístěna na skleněném nebo kovovém podkladě. Střídají se zde dvě pole, z nichž jedno propouští světlo, ale druhé ne. Na pohyblivém jezdci jsou celkem 4 pole, které světlo propouští. Tato pole jsou od sebe vzdálena $\frac{1}{4}$ rozteče.

Při natočení jezdce vůči stupnici jsme schopni dosáhnout přesnosti až 0,1 μm . Pohyb obrazce je převeden na elektrické signály.

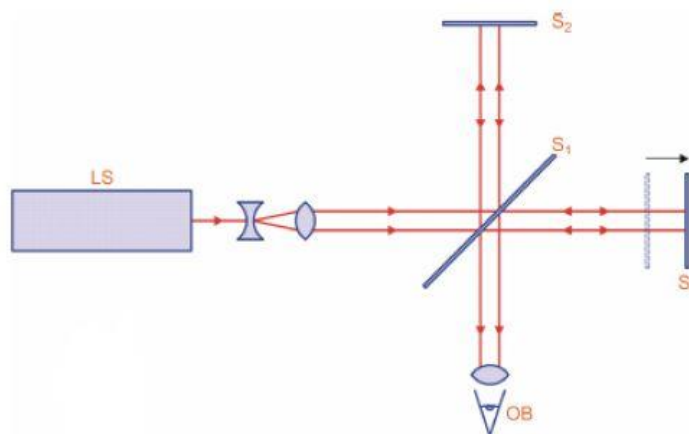
Výhodou je jednoduchá kalibrace. [1][2]

d) Laserový interferometr

U CMM se používají jen v nejnáročnějších aplikacích, jsou určeny spíše ke kontrole přesnosti samotného stroje. Cena těchto zařízení je v porovnání s ostatními vysoká. Jsou také velmi citlivé a jejich rozlišitelnost je až 0,01 μm .

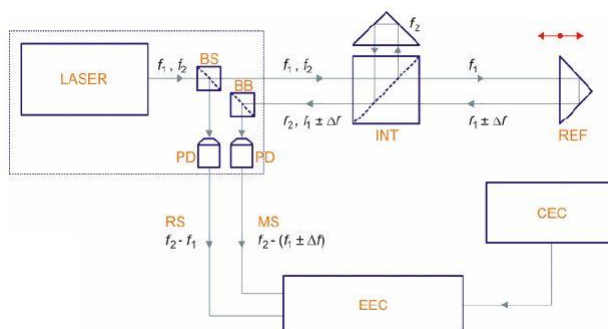
Základní princip je převzatý od optického interferometru. Zdroj světla produkuje paprsek světla, který je na polopropustném zrcadle rozložen na dva. Tyto paprsky jsou namířeny na odrazová zrcadla, od kterých se odráží na další polopropustné zrcadlo, na kterém se paprsky opět spojí – tomuto jevu se říká interference.

Většina interferometrů pracuje na heterodynamickém principu, kde se délka posunutí měřicího zrcadla určuje z frekvenčního posuvu laserového světla v důsledku Dopplerova jevu. [1][2]



Obrázek 11 – Michelsonův interferometr [1]

Heterodynní (dvojfrequenční) interferometry využívají laser, kde jsou na základě Zemannova jevu vyzařovány dvě frekvence, které jsou od sebe vzdáleny 1,8 MHz a navzájem se kruhově opačně polarizují. Pohyb odrazového zrcadla způsobí frekvenční posun, který nám umožní vypočítat jeho posun. Výhodou těchto interferometrů je rozlišení směru pohybu zrcadel a malá citlivost na ovlivňující jevy a nastavení systému. [1]



Obrázek 12 – Dvojfrequenční interferometr [1]

3.2.2 Optoelektrické měřicí systémy

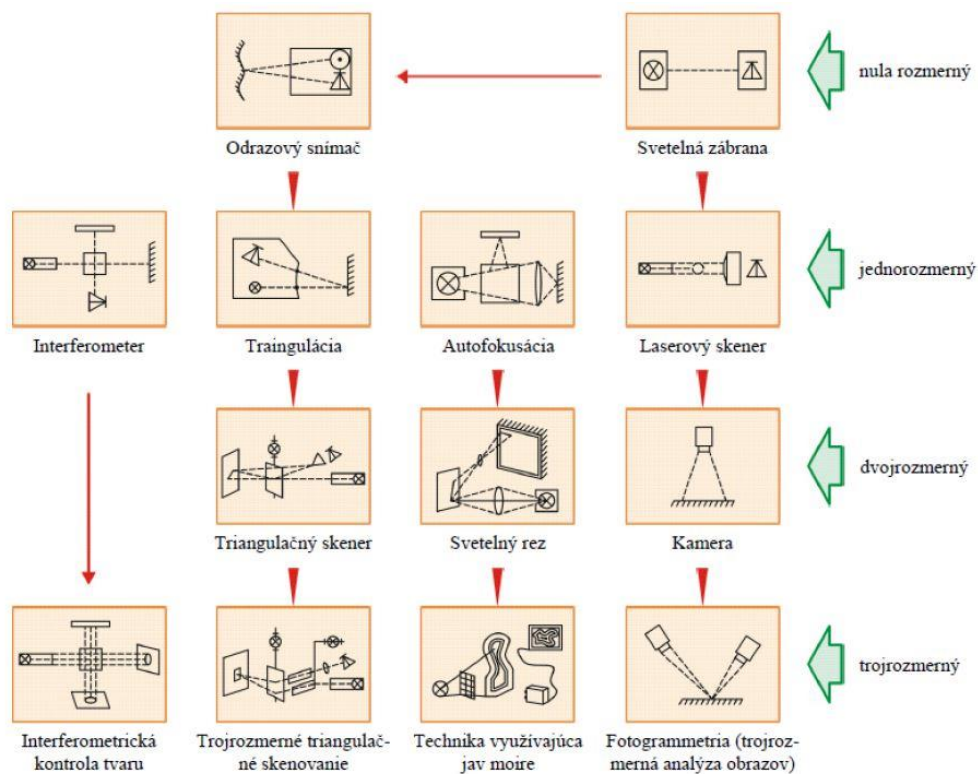
Využívají se na měření rozměrů a geometrických charakteristik objektů.

Během posledních 30 let se nejvíce používají světelné a bariérové snímače z důvodu jejich nízké ceny, odolnosti, rychlosti a efektivitě. S jejich komplexností ale jejich cena roste, což omezuje jejich plné využití pro aplikace ve 3D metodách.

Mezi 3D metody patří například interferometry, laserové skenování a jiné optické systémy.

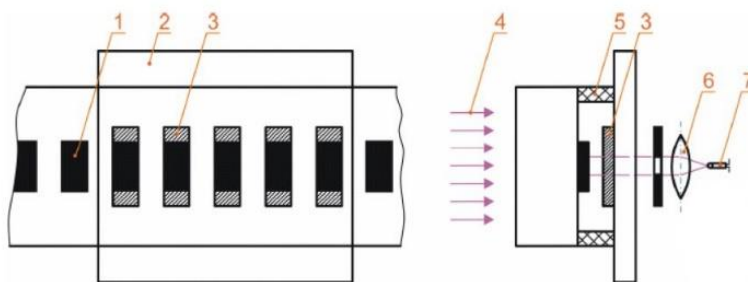
Z důvodu spolehlivosti, reprodukovatelnosti měření a efektivity měření na optoelektrických měřicích zařízeních je třeba dbát na jejich hranice použitelnosti a také na veličiny, které ovlivňují jejich měřicí vlastnosti. To může být například proměnlivost čistoty, barev a kvalita povrchu měřeného dílu.

Na kalibraci a referenční měření se používají dotekové metody.



Obrázek 13 – Optoelektrické měřicí systémy [1]

Na automatické měření délky a polohy používáme optoelektrická měřidla s číslicovým odčítáváním. Princip těchto měřidel je znázorněn na obrázku 14. [1]



Obrázek 14 – Princip optoelektického měřidla [1]

(1 – mřížka; 2 – pravoúhlá skleněná šablona; 3 – snímací šablona; 4 – rovnoběžné osvětlení; 5 – distanční mezikus; 6 – spojná čočka; 7 – fototranzistor)

4 Snímací systém

Důležitá součást CMM, která slouží ke snímání bodů na měřeném dílu. Po nasnímání bodů pomocí měřicího programu získáme číselné údaje o měřené veličině.

Snímací systém je připojen na pinolu a skládá se z těchto částí:

- Snímací hlavice
- Prodloužení snímací hlavy
- Systém výměny snímací hlavy
- Snímací dotek
- Systém výměny snímacího doteku
- Prodloužení snímacího doteku

Snímací hlavice rozlišujeme na dva typy:

- Pevné hlavice
- Indexovatelné hlavice (polohovatelné, natáčecí)

Pevné hlavice se nemohou otáčet v prostoru, ale mají vyšší přesnost než hlavice indexovatelné.



Obrázek 15 – Pevná snímací hlavice

Indexovatelné hlavice umožňují přesné polohování snímací sondy v pracovním prostoru. Sondy lze natáčet v jednotlivých osách a nastavit ji do požadované polohy.



Obrázek 16 – Indexovatelná snímací hlavice

Indexovatelné hlavice se dělí na dva typy:

- Motorické
- Manuální

Motorické hlavice jsou určeny k polohování sondy, což nám umožňuje provádět snímání v mnoha úhlech. Díky opakovatelnosti hlavice lze tyto polohy vyvolat bez nutnosti recalibrace a díky tomu obsluha ušetří čas. Sondu aplikuje k povrchu měřené součásti pod co nejlepším úhlem pro dosažení velmi přesných výsledků

Možné je i použití motorických hlavice se servopohonem, který zajistí neomezené úhlové polohování. Toto řešení je nejvhodnější pro CMM s horizontálním rámem. [1]

Manuální hlavice se nastavují ručně a umožňují flexibilní měření tvarově složitých součástí. Způsob snímání bodů na měřeném dílu má vliv na přesnost a automatizaci měření. [1]



Obrázek 17 – Manuální snímací hlavice

Snímací systémy dělíme na:

- Dotekové (kontaktní) – využití dotekových senzorů
- Bezdotekové (bezkontaktní) – využití optických senzorů

4.1 Dotekové snímací systémy

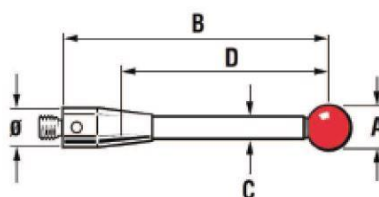
U starších typů CMM se používají pevné doteky ve tvaru kuličky, kuželky, válečku atd. Při nasnímaní bodu dá řídicí systém povel obsluze zaznamenat všechny souřadnice a na konci měření software vypočítá požadované veličiny.

U CMM s CNC řízením jsou nejčastěji používané elektro-kontaktní snímací systémy, které se rozdělují na systém sondy snímacího typu se skenující sondou a na systém sondy spínacího typu se sondou kontaktní. [1][2][3]

4.1.1 Měřicí doteky

Měřicí doteky zajišťují kontakt mezi měřenou součástí a sondou a způsobují samotné sepnutí mechanismu měřicí sondy. Generovaný signál nám umožňuje zaznamenat souřadnice nasnímaného bodu.

Typ a rozměr doteku volíme podle snímaného prvku. Vysoká tuhost a dokonalý tvar měřicí kuličky jsou velmi důležité vlastnosti doteku. [1]



Obrázek 18 – Rozměry doteku [1]

(A – průměr kuličky; B – celková délka; C – průměr dřívku; D – efektivní činná délka)

Pokud má být při měření dosaženo co nejvyšší přesnosti, je nutné držet se pravidel pro výběr správného doteku:

- Dotek by měl být co nejkratší, aby při měření nedocházelo k jeho prohýbání
- Používat co nejmenší počet prodlužovacích nástavců, protože každý spoj doteku způsobuje nepřesnosti

- Volit co nejvyšší průměr kuličky a stopky doteku z důvodu jejich vyšší tuhosti

Kuličky se vyrábí z různých materiálů a každý z nich má své využití.

Rubín – nepoužívanější a použitelný u většiny měřicích aplikací. Existují ale výjimečné aplikace, u kterých ho použít nelze.

Jednou z nich jsou výkonné skenovací aplikace na hliníkové materiály, protože zde dochází k tzv. adheznímu otěru, kdy na povrchu kuličky dochází k usazování hliníku.

Druhý případ, kdy rubín nelze použít jsou náročné aplikace při skenování litinových povrchů. Dochází zde k vzájemnému působení kuličky a litiny, které způsobuje opotřebení jejího povrchu.

Nitrid křemíku – vlastnostmi se velmi podobá rubínu. Jedná se o velmi tvrdý materiál, který je odolný proti opotřebení. Opotřebení otěrem se projevuje při kontaktu s ocelovými povrchy. Lze ho použít místo rubínu na výkonné skenovací aplikace hliníkových materiálů.

Oxid zirkoničitý – velmi pevný keramický materiál, který má podobnou tvrdost a opotřebení jako rubín. Je svým vlastnostem je ideální na agresivní aplikace u litinových součástek.

Diamant – díky své extrémní tvrdosti a hladkosti umožňuje nejpřesnější a nejekonomičtější měření. Tvrdost a hladkost je i důvodem pro minimální opotřebení při tření. Je vhodný téměř pro všechny aplikace. [1]

Díky měřicího doteku jsou vyráběny z:

- Oceli
- Karbidu wolframu
- Keramiky
- Uhlíkových vláken

4.1.2 Typy doteků

Přímé – nejjednodušší, přesná kulička připevněná na dřík

Hvězdicové – umožňují snímání složitých prvků nebo otvorů

Diskové – ke snímání zápichů a drážek

Doteky pro speciální účely

- Válcový
- Špička
- Dutá keramický polokoule
- Dotek na ustavení nástrojů

4.2 Bezdotekové snímací systémy

Laserové systémy

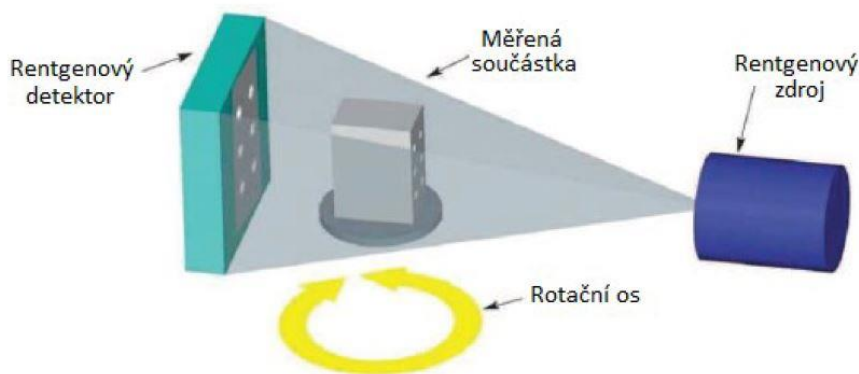
U laserových systémů jsou využity dva rovnoběžné paprsky, které se protínají v přesně definované vzdálenosti. Při průniku těchto paprsků na měřeném objektu je na vyhodnocovací jednotce zaznamenán dotek. Laserové systémy nám umožňují skenovat v jedné nebo ve třech rovinách. [1]

Kamerové systémy

Prostřednictvím optické kamery je optický signál přenesen na digitální obraz, který je ve vyhodnocovacím systému použit na výpočet měřených bodů. [1]

Počítačová tomografie (CT)

Jedná se o inspekční metodu, která je využívána v oblasti medicíny na diagnostiku vnitřních orgánů, ale najde využití i ve strojírenství a dalších oblastech. Metoda CT je založena na nedestruktivním způsobu získávání informací měřeného modulu. [1]



Obrázek 19 - Princip počítačové tomografie [1]

Mezi její **výhody** patří její vysoká přesnost snímání, možnost kontroly součástí s velmi komplikovaným tvarem a možnost vyhodnotit libovolné délkové rozměry, úhly, odchylky tvaru a polohy, a to i ve skrytých oblastech.

Nevýhodou je pořizovací cena tomografu, která může být i o řád vyšší než například cena běžného souřadnicového měřicího přístroje. Nevýhodou je také omezené měření v závislosti na velikosti měřené součásti. [1]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 Popis retrofitovaného stroje

Souřadnicový měřicí přístroj, na kterém budeme retrofit provádět, je Mitutoyo Euro C Apex 776.



Obrázek 20 – Mitutoyo Euro C Apex 776

Jedná se o přístroj s měřicím rozsahem 705x705x605 mm. Stroj měřil s délkovou odchylkou měření $E = (2,9 + 4,0L/1000) \mu\text{m}$ s rozlišením měřicího systému 0,0005 mm a odchylkou snímání 4 μm . Byl osazen snímacím systémem MPP-2. Oba použité doteky byly zakončeny rubínovou kuličkou. První dotek s délkou dřívku 20 mm byl osazen kuličkou s průměrem 3 mm, druhý s délkou dřívku 10 mm a kuličkou o průměru 8 mm.

První majitel stroj zakoupil roku 1999. Jednalo se o firmu GPN GmbH v Rakousku. Stroj byl následně v rámci skupiny GPN přesunut do České republiky kolem roku 2010. První servis stroje provedla firma KUBOUŠEK v roce 2012. Od té doby byl stroj v servisní správě společnosti KUBOUŠEK až do ukončení jeho provozu v srpnu 2019. Firma KUBOUŠEK poté stroj odkoupila.

Po dokončení retrofitu je plánován prodej stroje do českobudějovické společnosti, která se zabývá výrobou plechových dílů, soustružením a frézováním. Tato společnost ve své laboratoři provozuje i ručně vedený souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Crysta Plus M576. Manuálně vedený měřicí stroj však vyžaduje při měření 100% účast obsluhy. V kontrole kvality sériové výroby, zejména u větších společnostech, jsou tyto stroje neefektivní a náročné

jak na lidské, tak na finanční zdroje. Kapacita měření ručně vedeného souřadnicového měřicího přístroje i zde přestává stačit narůstající výrobě, a proto se vedení společnosti rozhodlo investovat do CNC technologie, která zvýší měřicí kapacitu stroje, ušetří čas operátora, který nemusí být u měření přítomen a zároveň vyhoví narůstajícím požadavkům odběratelů na přesnost výroby.

Retrofitovaný souřadnicový měřicí stroj s 5ti-osým snímacím systémem je zde ideálním řešením, ve kterém se setkává příznivá pořizovací cena s maximálním výkonem moderního snímacího systému a moderního softwaru, který podporuje práci s 3D CAD daty. V konkrétním případě jde o zvýšení měřicího rozsahu z původních $X = 500$ mm, $Y = 400$ mm na $X = 700$ mm, $Y = 700$ mm a $Z = 600$ mm a zároveň o zvýšení přesnosti o přibližně 36 %.

6 Kompletní odstojení před uvedením do provozu a příprava na přestavbu

6.1 Odstojení plechů a jejich příprava na lak, vyčištění stroje a demontáž původních ventilátorů

Na všech činnostech uvedených v této kapitole jsem pracoval společně s kolegy.

Po převozu stroje do skladu společnosti KUBOUŠEK bylo potřeba odmontovat všechny plechy, které byly později přeměřeny a připraveny na lakování. Odstojený stroj bylo nutné vyčistit od prachu a ostatních nečistot. Z některých plechů byly také odmontovány ventilátory, které bylo potřeba vyměnit za nové. Byly totiž zaneseny prachem a usazeným olejem. Jejich ložiska byla také značně zanesena a opotřebena, což při provozu stroje způsobovalo hlučnost. Vzhledem k relativně nízké ceně jsme dali přesnost nákupu nových.

Některé krycí plechy byly vlivem používání a často i neopatrností obsluhy zohýbané či jinak poškozené. Poškozené plechy jsme proto pečlivě narovnali, aby správně pasovaly na konstrukci stroje a nedošlo tak ke zvýraznění poškození po aplikaci laku. Starý lak a nečistoty byly z plechů otryskány a dodatečně odstraněny chemicky. Nový lak byl aplikován metodou práškového lakování a následným vypálením v peci.

Některé části stroje nebylo možno rozebrat tak, aby se vešly do lakovny. Jednalo se o tzv. most stroje a další díly, jejichž rozebrání by mohlo způsobit nenávratné poškození geometrie stroje. Tyto části bylo tedy nutné lakovat ručně. Po důkladném očištění byly zakryty všechny části stroje, u kterých by hrozilo poškození barvou. Jednalo se především o

odměřovací pravítka, obnažené elektronické obchody (předzesilovače signálů) a pojezdové plochy, po kterých se pohybují vzduchová ložiska. Nanesení barvy na tyto plochy by způsobilo velmi vysokou odchylku v měření. (Obrázek 23)

Součástí čištění stroje byla také kontrola všech vzduchových ložisek a vodících tyčí. U těch ložisek, u kterých to bylo nutné, byla provedena běžná údržba a obě vodící tyče na osách X a Y byly taky očištěny a promazány.



Obrázek 21 – Přeměření a příprava plechů na převoz do lakovny



Obrázek 22 – Původní ventilátory



Obrázek 23 – Příprava stroje na ruční lakování

6.2 Kontrola pohonného ústrojí

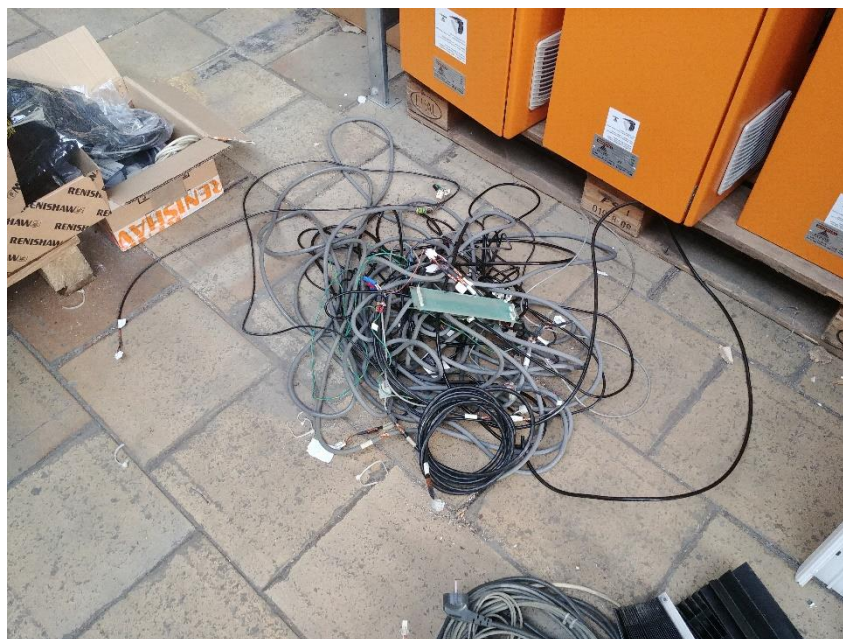
Abychom se s kolegy ujistili, že stroj bude po retrofitu dlouho v dobré kondici, rozhodli jsme se také zkontrolovat pohonný systém stroje včetně vodících tyčí, kuličkových šroubů a řemenů. Řemeny nevykazovaly žádnou nadměrnou vůli, a proto nebylo nutné je měnit. U motorů však bylo viditelné výrazné opotřebení, které by brzy způsobilo chybové hlášení a odstavení stroje. Kromě opotřebení jsme také zjistili silné zanesení uhlíkovým prachem. Všechny motory jsme proto řádně vyčistili, osadili novými uhlíky a přeměřili. Vodící tyče jsme ošetřili a namazali. Kuličkové šrouby, kterými motory uvádí jednotlivé osy do pohybu jsme museli nechat zrenovat. Jejich vůle byly příliš vysoké a způsobovaly nepřijatelnou nepřesnost polohování stroje a tím pádem i zhoršenou přesnost při měření.



Obrázek 24 – Původní pohonné ústrojí

6.3 Demontáž původní řídicí jednotky, odpojení čidel, motorů, kontrolérů a snímacího systému

Jelikož součástí retrofitu stroje bylo připojení nové a modernější řídicí jednotky Renishaw UCC T5 společně se servozesilovačem SPA3, o kterých se budeme bavit v kapitole 8, bylo potřeba odpojit veškerá původní čidla a řídicí jednotku. Společně s těmito komponenty byly odpojeny i staré kontroléry a celý původní snímací systém.

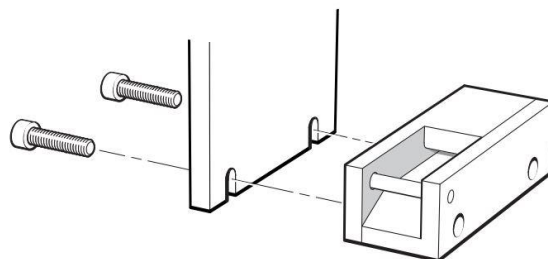


Obrázek 25 – Původní čidla a řídicí systém

7 Montáž nového odměřování

Montáž pravítek jsme provedli společně s mými kolegy.

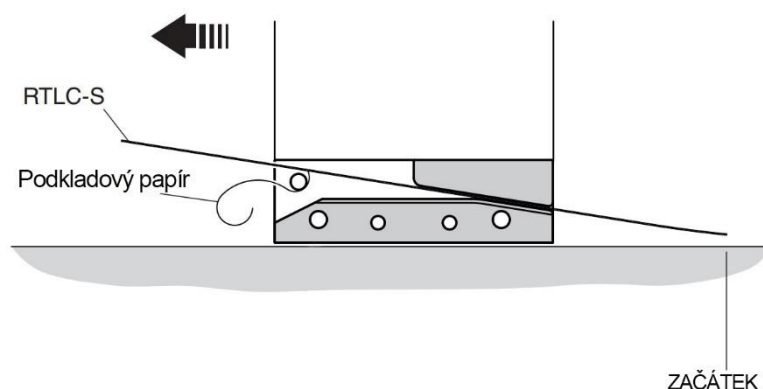
Před montáží nových pravítek bylo potřeba důkladně očistit a odmastit plochu, na kterou byla pravítka později přilepena. Dále bylo důležité nechat pravítka před nalepením aklimatizovat. V dalším kroku jsme si naměřili potřebnou délku a pravítka následně ustříhli. Poté jsme namontovali vhodný aplikátor na místo snímače.



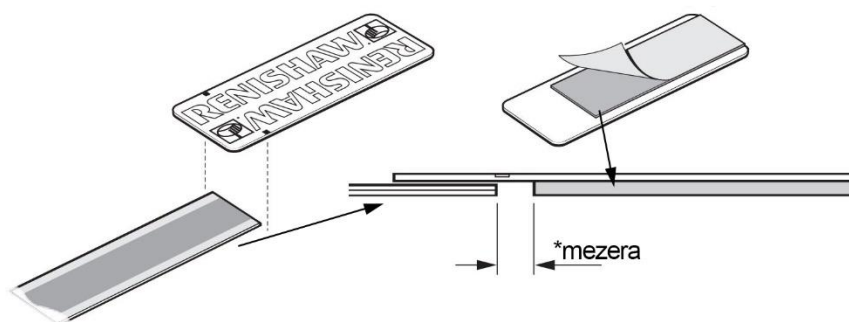
Obrázek 26 – Aplikátor pravítka

Do tohoto aplikátoru jsme umístili připravené pravítko s potřebnou délkou, jeho začátek přimáčkli a ujistili se, že je přilepený a poté pomalým a plynulým tahem pojezdu aplikovali celé pravítko. Bylo nutné dbát na to, aby se odlepovaná fólie ze spodní strany pravítka nedostala pod aplikátor.

Zkontrolovali jsme, jestli je pravítko správně přilepené a domáčkli ho. Poté jsme nalepili koncové zarážky tak, aby zůstala mezer* mezi koncem pravítka a lepicí plochou zarážky. Tato mezer* je nutná pro posun pravítka.



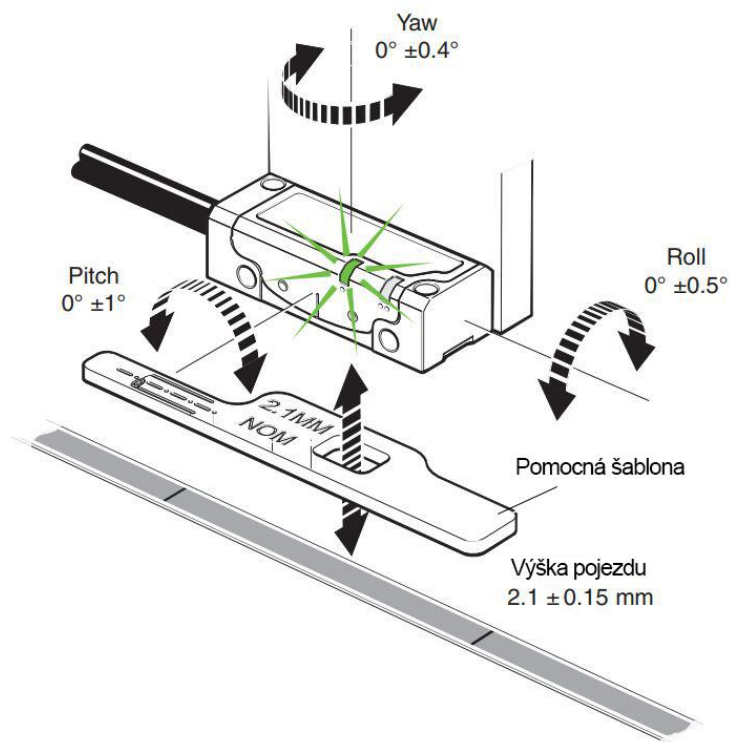
Obrázek 27 – Lepení pravítka pomocí aplikátoru



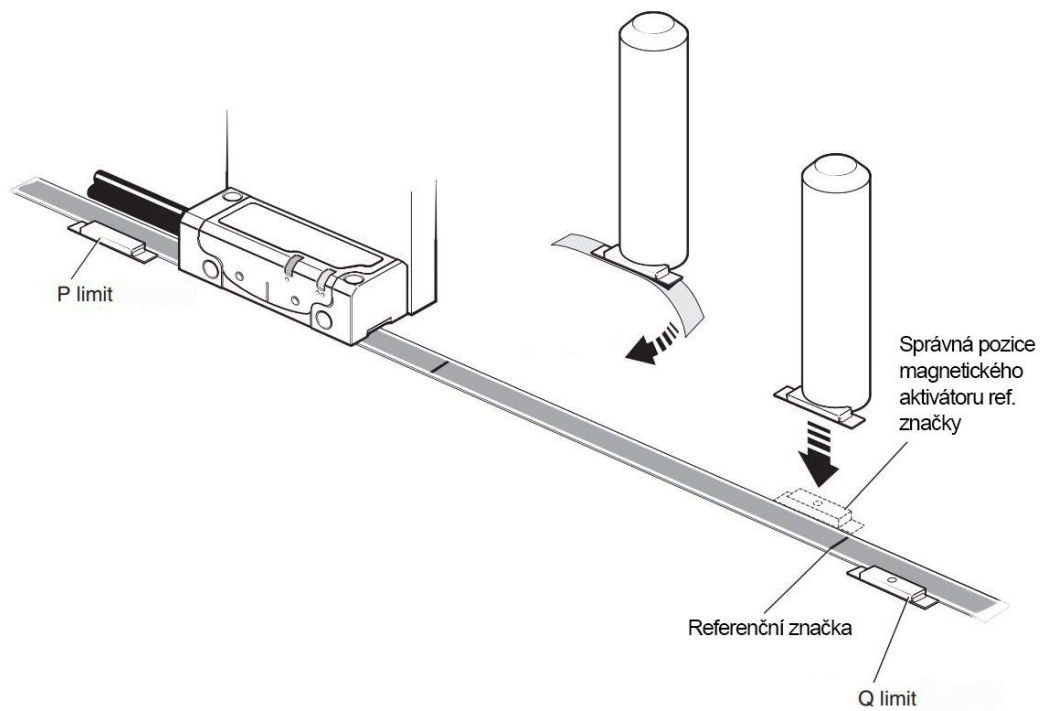
Obrázek 28 – Lepení koncových zarážek

Po nalepení samotných pravítek bylo třeba nalepit aktivátory referenčních značek. Bylo důležité zachovat relativní polohu značek vůči snímači. Držáky snímače musí být přichyceny na rovný povrch, na kterém je bude možné seřídit tak, aby splnily instalační požadavky a šla na nich nastavit výška pojezdu čtecí hlavy. Měly by být připevněny tak, aby při provozu nedocházelo k výchylkám z důvodu vibrací.

Seřízení jsme provedli podle pomocné šablony. Správné seřízení čtecí hlavy je signalizováno rozsvícením zelené LED diody na snímači.



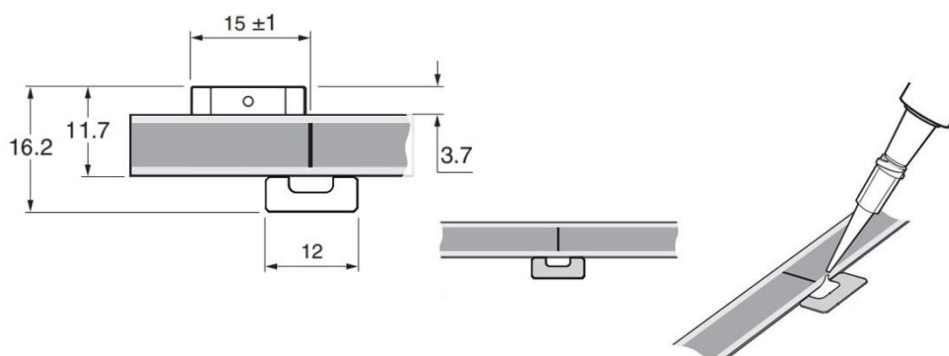
Obrázek 29 – Seřízení snímače pravítka



Obrázek 30 – Aplikace magnetického aktivátoru referenční značky

U magnetických aktivátorů je velmi důležité, aby v žádném místě nezasahovaly do plochy pravítka.

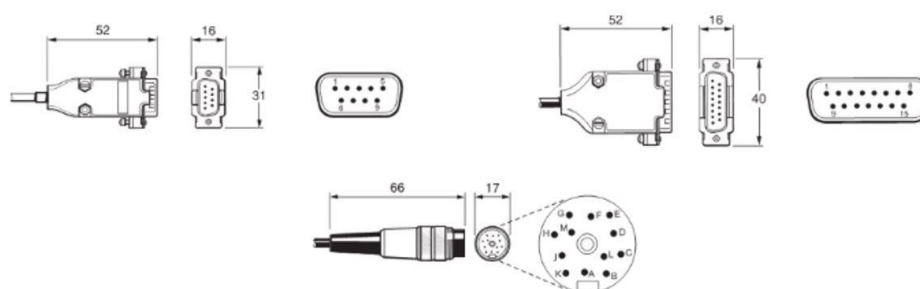
Posledním krokem při montáži pravítka bylo přilepení zarážky, která slouží k pevnému přichycení pravítka v místě, na které zarážku přilepíme. Tuto zarážku lze nalepit na libovolné místo po celé délce pravítka. V našem případě byla přilepena naproti referenční značce. Při lepení bylo opět nutné dbát na to, aby zarážka nepřekrývala plochu pravítka.



Obrázek 31 – Přilepení zarážky pravítka

Po dokončení montáže pravítka jsme snímač zapojili do jednotky a nakonfigurovali ho podle tabulky výstupů ze snímače.

Funkce	Signál	9 pinový D konektor	15 pinový D konektor	12 pinový kulatý konektor
Napájení	5V	5	7,8	G
	0V	1	2,9	H
Inkrementální odečet souřadnic	A	+	2	14
		-	6	6
	B	+	4	13
		-	8	5
Referenční signál	Z	+	3	12
		-	7	4
Limity	P		11	A
	Q		10	B
Alarm	E		3	F
Remote cal	CAL	9	1	C
Zemění		Konektor	Konektor	Konektor



Obrázek 32 – Tabulka výstupů snímače

8 Osazení stroje novým řídicím a snímacím systémem

8.1 Připojení kontroléru UCCT5 a servozesilovače SPA3

Se zapojením a instalací kontroléru, servozesilovače a nové hlavy nám pomohl kolega z Brněnské pobočky společnosti Renishaw.

Renishaw UCC T5 je řídicí systém pro souřadnicové měřicí stroje vybavené 5ti-osým dotekovým měřením, jako je v našem případě použitá hlava Renishaw PH20. Tento řídicí systém je nutné zapojit společně se zesilovačem Renishaw SPA3. Systém využívá externí zdroj napájení, který zajišťuje plné ovládání hlavy, stroje, signálů sondy a umožňuje komunikaci s počítačem. Systém je dále vybaven integrovanou kompenzací chyb vzniklých vlivem teploty. Lze k němu připojit až 16 teplotních senzorů. Komunikace mezi UCC T5 a počítače je zajištěna pomocí ethernet kabelu. [5]



Obrázek 33 – Kontrolér Renishaw UCC T5

Při montáži kontroléru bylo nutné dbát na to, aby na obou stranách bylo alespoň 10 mm prostoru, aby ventilátory, které slouží ke chlazení jednotky, mohly správně fungovat. Samotné zapojení kontroléru jsme provedli podle příručky od výrobce. Aby kontrolér správně komunikoval s PC, je nutné mít nainstalovaný software UCCassist-2, ve kterém kontroléru nastavíme správnou IP adresu.

Servozesilovač Renishaw SPA3 napájí tři základní osy souřadnicového měřicího přístroje. Je schopen přijímat vstupní signály ze spínačů tlaku vzduchu, detekce kolize a ze všech vnitřních a vnějších koncových spínačů os. Je schopen nezávisle nastavit napětí na jednotlivých osách, což umožňuje používat různá napětí motorů. [6]



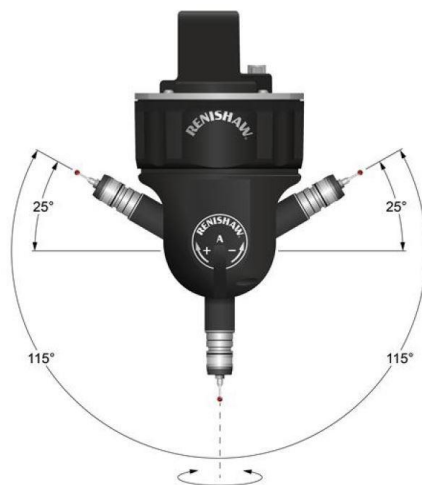
Obrázek 34 – Servozesilovač Renishaw SPA3

Při montáži opět dbáme na dostatek prostoru pro správnou funkci chladících ventilátorů. Schopnost stroje měřit současně ve všech pěti osách je dosažena interakcí mezi kontrolérem, hlavou a servozsilovačem. Propojení těchto tří komponentů dokážeme koordinovat pohyb v osách X, Y a Z samotného stroje společně s pohybem dvou os (A, B) na měřicí hlavě.

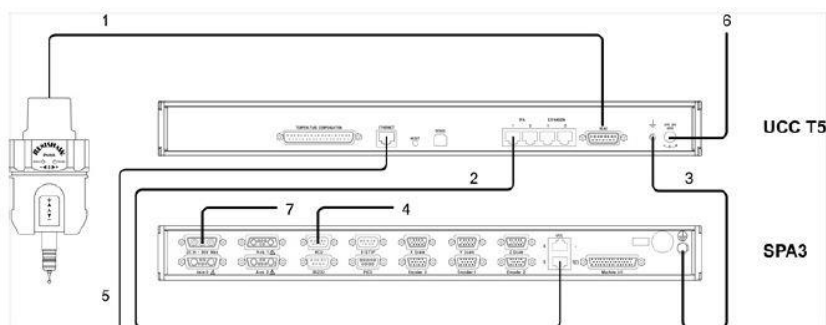
8.2 Montáž hlavy PH20

K montáži nové měřicí hlavy byl potřeba speciálně navržený montážní adaptér. Tento adaptér umožňuje připojení hlavy k pinole, se kterou by normálně nebyl kompatibilní.

Pro samotnou instalaci bylo nutné nastavit pinolu do pozice, která nám co nejvíce usnadní montáž hlavy. Řídící kabel hlavy protáhneme pinolou a připevníme ho pomocí upínacích svorek. Poté k pinole přimontujeme výše zmíněný adaptér, do kterého zasuneme samotnou měřicí hlavu. Ujistíme se, že všechny konektory jsou na svém místě a hlavu k adaptéru přimontujeme pomocí šroubů.

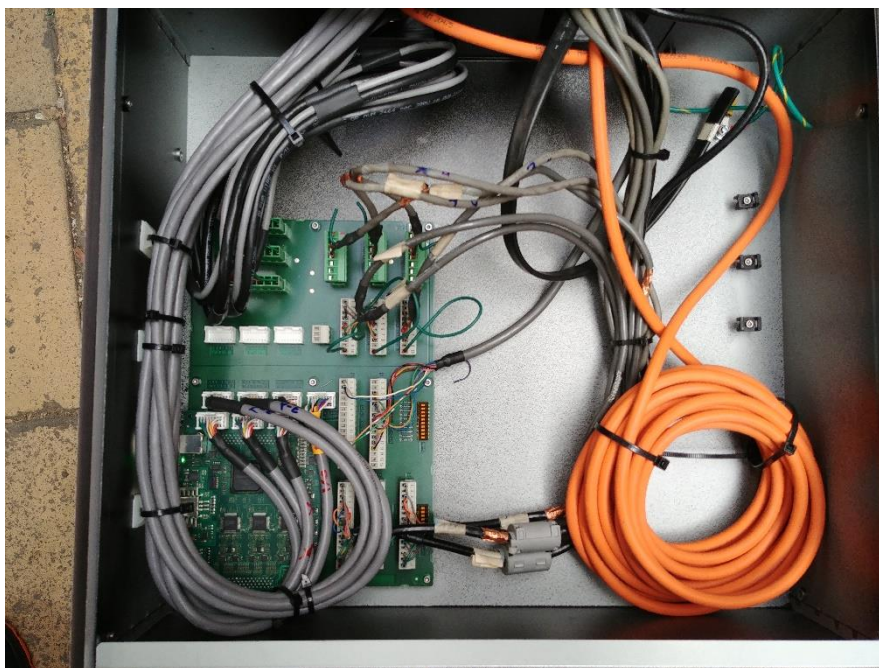


Obrázek 35 – Měřicí hlava Renishaw PH20 [7]



Obrázek 36 – Diagram propojení hlavy s kontrolérem a servozsilovačem [7]

1	Komunikační kabel hlavy (oranžový)
2	Kabel CAT 5
3	Uzemnění
4	Připojení manuální řídicí jednotky (joystick)
5	Kabel ethernet CAT 5E pro propojení s PC
6	Napájecí kabel (24 V)
7	Napájecí kabel (24 V – 80 V)



Obrázek 37 – Zapojení UCC T5, SPA3 a komunikačního kabelu hlavy



Obrázek 38 – Umístění UCC T5 a SPA3 do předem připraveného boxu

9 Vytvoření nové chybové mapy stroje

Chybovou mapu stroje vytvoříme podle průvodce v softwaru UCC Assist II. Na její vytvoření použijeme laserový interferometr Renishaw XL-80. Samotný interferometr připevníme na speciální přípravek, který lze přimontovat ke stolu souřadnicového měřicího přístroje. Umístění interferometru závisí na tom, jakou osou chceme začít. Záleží tedy jen na nás, kterou si zvolíme jako první.

Zrcátko, od kterého se laserový paprsek odráží zpět do senzoru interferometru připevníme k pinole stroje a posuvem osy Z ho nastavíme tak, abychom dostali co nejlepší signál. Sílu signálu vidíme na LED diodách na samotném interferometru.



Obrázek 39 – Laserový interferometr Renishaw XL-80

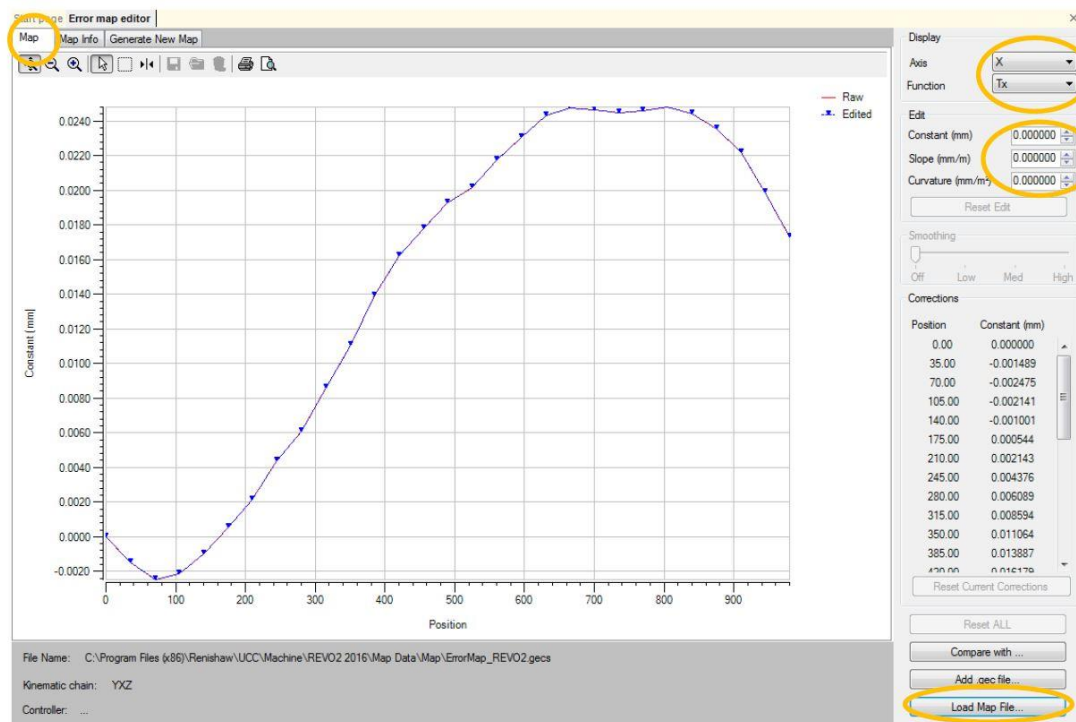
Po nastavení interferometru pokračujeme podle průvodce v UCC Assist. Je nutné zde zadat délku měřené osy a počet kroků na dané ose. Po spuštění měření stroj postupně posouvá zrcátkem s krokem 10 cm z jedné strany stolu na druhou, než nasnímá dostatečný počet bodů pro celou délku měřené osy. Po dojezdu na konec osy se zrcátko vrátí zpět do počáteční polohy a software vyhodnotí naměřené veličiny. Poté interferometr posuneme přibližně o 10 cm na pravou nebo levou stranu, podle toho, z jaké strany jsme s měřením začínali a tento postup opakujeme. Po dokončení měření pro celou plochu v jedné ose interferometr připevníme tak, abychom mohli měření provést pro kolmou osu. Tímto způsobem vytvoříme dvourozměrnou mřížku pro osy X a Y.

Pro osu Z je nutné použít zrcátko, které laserový paprsek odráží v úhlu 90°, jelikož se osa Z posouvá ve vertikálním směru, ale laserový paprsek vycházející z interferometru je horizontální. Po správném nastavení interferometru je už postup měření shodný s osami X a Y.

Po nasnímání všech potřebných bodů získáme trojrozměrnou chybovou mapu stroje. Software UCC Assist nám nabízí možnost tuto mapu upravovat pomocí nástroje Error Map Editor. Tento nástroj umí otevřít chybovou mapu a zobrazit její průběh. Máme možnost

vybrat jednotlivé chyby na jednotlivých osách. Na mapě lze upravovat hned několik parametrů. A to:

- Constant - tento parametr posouvá celou mapu nahoru nebo dolů.
- Slope - změní trend křivky, což znamená, že počátek bude ponechán beze změny, ale konec křivky se posune o danou hodnotu. Body ležící mezi počátkem a koncem posune proporcionálně podle jejich umístění. Hodnotu zadáváme v mm/m. Jedná se o nejpoužívanější způsob opravy chybové mapy.
- Curvature - změní křivku podobně jako parametr slope. Změna bodů mezi počátkem a koncem není lineární, ale jde po křivce. Zadává se zde hodnota mm/m².

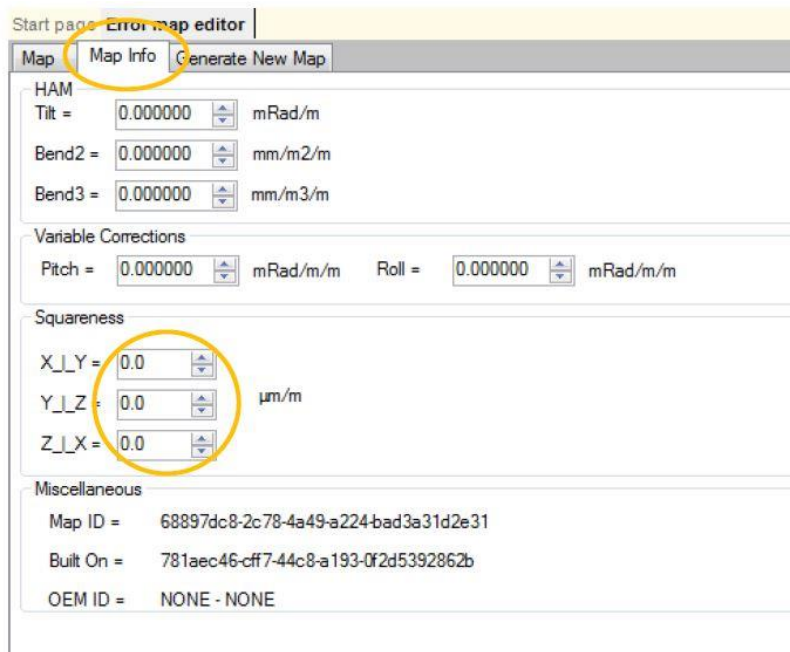


Obrázek 40 – Error map editor

Je zde také možnost uchopit myší jednotlivé body na křivce a posouvat je. Tato metoda ale v praxi má jen malé využití.

Druhá záložka Error map editoru se nazývá „Map info“. V této záložce máme možnost zadat a kontrolovat hodnoty kolmostí os, ID mapy, případně stav zamčení mapy (OEM ID).

Poslední záložka v nástroji Error map editor je „Generate new map“. Zde je možné provedené změny uložit. Pro uložení můžeme použít stejné jméno souboru, čímž se původní soubor přepíše. Z toho důvodu je doporučeno zvolit pro soubor nové jméno, například přidat datum a číselné označení. Tímto způsobem se můžeme později vrátit k předchozímu stavu mapy. Po uložení se náš systém zeptá, zda chceme nakonfigurovat systém tak, aby použil novou mapu s námi zvoleným novým jménem, a zda chceme, aby se tato nová mapa ihned zavedla do řízení a stala se aktivní.



Obrázek 41 – Záložka „Map info“

10 Akreditovaná kalibrace

Stejně jako tvorbu chybové mapy kalibraci provedli moji kolegové ze společnosti KUBOUŠEK. Pro kalibraci stroje byla použita kalibrační metoda pro souřadnicové měřicí stroje s měřicím rozsahem 0–2000 mm. Tato metoda je v souladu s normou ČSN EN ISO 10360-2.

Před kalibrací bylo nutné mít nachystané všechny potřebné prostředky:

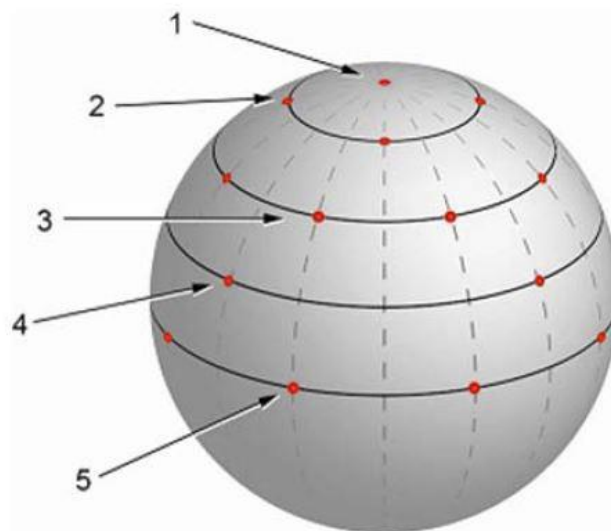
- Koncové měrky, které před použitím důkladně očistíme
- Kontrolní koule, kterou také očistíme
- Vodováha
- Teploměr s vlhkoměrem a dotykovou sondou s dělením 0,2°C
- Upínací a polohovací soustava na etalony
- Čisticí prostředky – technický benzín, vata, rukavice

Kalibrace se vždy musí provádět v místnosti, kde nepůsobí vnější vlivy jako například otřesy nebo přímé sluneční světlo. V místnosti je nutné udržovat stálou teplotu 20°C s tolerancí $\pm 2^\circ\text{C}$, u laboratorních souřadnicových měřicích přístrojů v dobře klimatizovaných prostorech s vlhkostí $(50 \pm 30)\%$ a s minimální prašností. V dílnách a neklimatizovaných prostorech kalibraci provádíme za teploty $(22 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Před kalibrací necháme všechny etalony temperovat po dobu 4 hodin. Teplota všech použitých etalonů, měřidel a kalibrovaného souřadnicového měřicího přístroje se vždy měří před a následně po ukončení kalibrace.

Body, na které se při kalibraci souřadnicového měřicího přístroje zaměřujeme, jsou kontrola samotného snímacího systému CMM, kontrola jeho geometrie a kontrola přesnosti délkových měření.

Kontrola snímacího systému souřadnicového měřicího přístroje (měřicí hlava, snímač a snímací kulička) je provedena pomocí kontrolní kalibrační koule. Tuto kouli umístíme do libovolné části stolu CMM. Na kouli provedeme měření pomocí 4 bodů, které jsou rozloženy po celé ploše koule přibližně po 120°. Poté provedeme další měření pomocí 5 bodů, z nichž 4 leží na rovníku a jsou rozloženy přibližně po 90° a pátý bod snímáme na vrchlíku koule. Třetí měření, tentokrát pomocí 17 bodů rozložených tak, že 12 bodů je umístěných na rovníku přibližně po 15°, další body snímáme přibližně v těžištích kvadrantů polokoule a 17. bod snímáme opět na vrchlíku. Po nasnímání všech potřebných bodů vyhodnocujeme rozptyl naměřených průměrů a porovnáváme je se skutečnou hodnotou průměru koule. Naměřená hodnota nesmí překročit parametr **R** - kladná konstantní chyba, kterou udává výrobce přístroje.



Obrázek 42 – Příklad rozmístění snímaných bodů na kontrolní kouli

Kontrolou geometrie stroje je myšlena kontrola rovinnosti stolu CMM. Tato kontrola je provedena na základě požadavků zákazníka postupem pro kontrolu průměrných desek pomocí přesné libely.

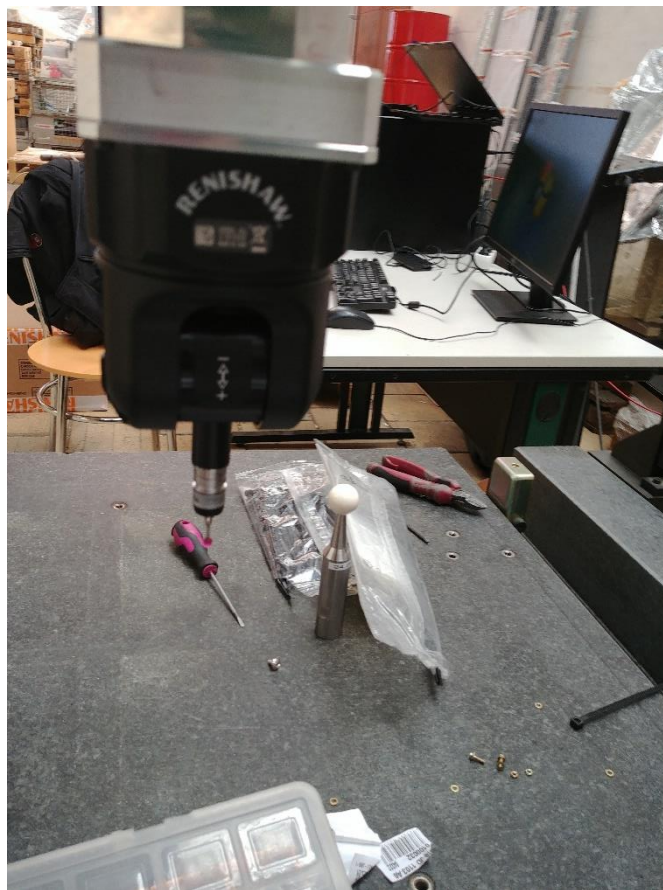
Kontrola přesnosti délkových měření je prováděna na řadě pěti kusů koncových měrek, které umístíme ve směru nejdelší osy přístroje. Provedeme vyrovnání souřadného systému CMM podle polohy etalonu a určíme směr měřené osy. Měřicím systémem změříme středy ploch jednotlivých ploch etalonů. Toto měření opakujeme alespoň 3x. Poté řadu pěti použitých měrek umístíme ve směru příčné osy stroje a měření opakujeme. Totéž provedeme i pro svislou osu. Po kontrole všech tří základních os provedeme měření na

stupňové měrce, kterou postupně umístíme do čtyř prostorových uhlopříček v měřicím prostoru stroje a měření opakujeme. Všechna naměřená data zapisujeme do záznamu o měření a porovnáváme je s předepsanými parametry stroje.

Celý kalibrační proces jsme opakovali ještě jednou pro druhý dotek, který byl umístěn do zásobníku na měřicím stole stroje. Po nakalibrování obou doteků jsme stroj naprogramovali tak, aby byl schopen si doteky automaticky měnit.



Obrázek 43 – Zásobník Renishaw TCR20



Obrázek 44 – Příprava stroje na kalibraci pomocí kontrolní koule

11 Závěr

Cílem práce bylo představit a popsat přestavbu a znovuoživení vysloužilého a nefunkčního souřadnicového měřicího stroje a porovnat jeho původní přesnosti s přesnostmi po osazení moderním snímacím zařízením, díky kterému bude stroj schopen opět fungovat v reálném provozu a zároveň vyhoví dnešním standardům a vysokým požadavkům na kvalitu a přesnost ve výrobě.

Pro dosažení těchto cílů byl stroj osazen moderním 5ti-osým snímacím systémem Renishaw PH20 se sondou Renishaw TP20, řídicím systémem UCC T5 a servozsilovačem SPA3. Společně s těmito součástmi jsme do stroje nainstalovali také nový odměřovací systém. Tyto zásahy proběhly úspěšně. Nyní je díky nim stroj schopen provádět rychlé a přesné měření v 5ti osách. Jakožto retrofitovaný stroj tak nabízí ideální řešení pro firmy, které hledají souřadnicový měřicí stroj s maximálním výkonem moderního snímacího systému, ale nechtějí investovat velké částky do nového stroje.

S ohledem na příznivé vyhodnocení celého retrofitu bylo dokonce rozhodnuto uvést stroj jako součást výstavy společnosti KUBOUŠEK na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně.

O stroj projevila zájem Českobudějovická firma zabývající se výrobou plechových dílů, soustružením a frézováním. Po úplném dokončení retrofitu je již plánován prodej stroje do této firmy. Z důvodu současné situace způsobené pandemií se ale jeho odebrání posunulo o minimálně půl roku.

12 Seznam použité literatury

[1] ČEPOVÁ, Lenka, PETŘKOVSKÁ Lenka. Legislativa ve strojírenské technologii a přesné měření 3D ploch. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 2011, 125 s. ISBN 978-80-248-2514-4

[2] POKORNÝ, Přemysl. Souřadnicové měřicí stroje. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 1999. 76 s. ISBN 80-7083-326-2.

[3] NOVOTNÝ, Roman. Problematika 3D měření. Zlín, 2017, 68s. Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická

[4] Mitutoyo Corporation. METROLOGY HANDBOOK – The science of measurement, Berkshire, 2018. 397s. ISBN 978-0-9556133-1-9

[5] Instalační příručka Renishaw: UCC T5 PH20 CMM controller installation guide, Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/--60150>

[6] Instalační příručka Renishaw: SPA3 installation guide, Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/--56302>

[7] Instalační příručka Renishaw: PH20 installation and user's guide, Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/ph20--22122>

13 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Části souřadnicového měřicího přístroje	5
Obrázek 2 – Trendy výrobní přesnosti	7
Obrázek 3 – Jednosouřadnicový CMM	10
Obrázek 4 – Dvousouřadnicový CMM	10
Obrázek 5 – Třísouřadnicový CMM	11
Obrázek 6 – Rozdělení CMM podle uspořádání	12
Obrázek 7 – Základní geometrické elementy	12
Obrázek 8 – Princip souřadnicového měření	13
Obrázek 9 – Definice elementů a charakteristik	14
Obrázek 10 – Komplexní měřicí systémy	16
Obrázek 11 – Michelsonův interferometr	18
Obrázek 12 – Dvojfrekvenční interferometr	18
Obrázek 13 – Optoelektrické měřicí systémy	19
Obrázek 14 – Princip optoelektrického měřidla	20
Obrázek 15 – Pevná snímací hlavice	20
Obrázek 16 – Indexovatelná snímací hlavice	21
Obrázek 17 – Manuální snímací hlavice	21

Obrázek 18 – Rozměry doteku	22
Obrázek 19 – Princip počítačové tomografie	24
Obrázek 20 – Mitutoyo Euro C Apex 776	25
Obrázek 21 – Přeměření a příprava plechů na převoz do lakovny	27
Obrázek 22 – Původní ventilátory	27
Obrázek 23 – Příprava stroje na ruční lakování	28
Obrázek 24 – Původní pohonné ústrojí	28
Obrázek 25 – Původní čidla a řídicí systém	29
Obrázek 26 – Aplikátor pravítka	29
Obrázek 27 – Lepení pravítka pomocí aplikátoru	30
Obrázek 28 – Lepení koncových zarážek	30
Obrázek 29 – Seřízení snímače pravítka	31
Obrázek 30 – Aplikace magnetického aktivátoru referenční značky	31
Obrázek 31 – Přilepení zarážky pravítka	32
Obrázek 32 – Tabulka výstupů snímače	32
Obrázek 33 – Kontrolér Renishaw UCC TP	33
Obrázek 34 – Servozesilovač Renishaw SPA3	33
Obrázek 35 – Měřicí hlava Renishaw PH20	34
Obrázek 36 – Diagram propojení hlavy s kontrolérem a servozesilovačem	34
Obrázek 37 – Zapojení UCC T5, SPA3 a komunikačního kabelu hlavy	35
Obrázek 38 – Umístění UCC T5 a SPA3 do předem připraveného boxu	35
Obrázek 39 – Laserový interferometr Renishaw XL-80	36
Obrázek 40 – Error map editor	37
Obrázek 41 – Záložka „Map info“	38
Obrázek 42 – Příklad rozmístění bodů snímaných bodů na kontrolní kouli	39
Obrázek 43 – Zásobník Renishaw TCR20	40
Obrázek 44 – Příprava stroje na kalibraci pomocí kontrolní koule	40