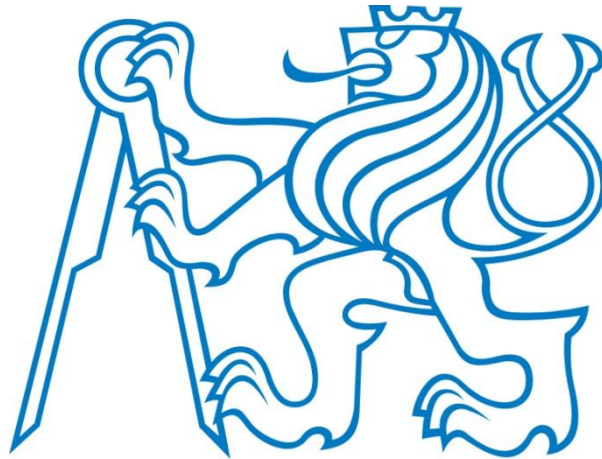


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Problematika měření obecných tvarových ploch
s využitím CMM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

| | |
|--------------------------|---|
| Autor: | Eliška Hrbková |
| Studijní program: | Výroba a ekonomika ve strojírenství |
| Studijní obor: | Technologie, materiály a ekonomika strojírenství |
| Vedoucí práce: | Ing. Libor Beránek, Ph.D. |



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis



Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení při práci. Také bych chtěla poděkovat panu Ing. Vladimíru Šulcovi za pomoc při řešení praktické části práce a mé rodině za podporu při celém průběhu studia.



Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku měření obecných tvarových ploch s využitím CMM. První část se zabývá obecným popisem souřadnicové měřicí techniky. Zvláště je zaměřena na možné konstrukce souřadnicových měřicích strojů, možnosti snímacích systémů a typy odměřování. V další části je rozebírán princip souřadnicového měření s popisem ke každému bodu kontroly součásti. Další část je zaměřena na měření křivek. V závěru práce je navržen, sestaven a odzkoušen plán měření obecné tvarové plochy. Každý bod plánu měření je krátce okomentován.

Klíčová slova

CMM, souřadnicové měřicí stroje, souřadnicové měřicí techniky, průmyslová metrologie, kontrola kvality.

Abstract

This bachelor thesis is focused on metrology of free form surfaces on Coordinate Measuring Machines. The thesis introduction describes generic coordinate measurement methods, especially is focused on possible structures of coordinate measuring machines, design of measuring heads and position feedback systems. The next section describes the principle of coordinate measurement techniques with a description of every part quality check point. A machine part surface measuring plan is designed, programmed and verified in the finish section of the thesis.

Keywords

CMM, Coordinate Measuring Machines, coordinate measuring techniques, industrial metrology, quality control.



Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 6 |
| 1. Obecný popis souřadnicového měřicího stroje | 7 |
| 1.1 Konstrukce CMM..... | 7 |
| 1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM | 9 |
| 1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM | 11 |
| 1.2 Snímací systémy..... | 13 |
| 1.2.1 Dotykové snímací systémy | 14 |
| 1.2.2. Bezdotykové snímací systémy..... | 19 |
| 1.3 Uložení pohyblivých částí..... | 21 |
| 1.4 Pohony..... | 22 |
| 1.5 Odměrovací systémy | 25 |
| 1.5.1 Optické odměrovací systémy..... | 26 |
| 1.5.2 Rotační enkodéry | 29 |
| 1.5.3 Induktosynové odměrovací systémy..... | 30 |
| 1.5.4 Magnetické odměrovací systémy..... | 30 |
| 1.5.6 Laserové interferometry..... | 31 |
| 2. Princip souřadnicového měření..... | 32 |
| 2.1 Analýza výkresové dokumentace..... | 33 |
| 2.2 Snímací systém..... | 34 |
| 2.3 Upnutí součásti..... | 34 |
| 2.4 Kalibrace snímacího systému..... | 35 |
| 2.5 Vyrovnání součásti..... | 38 |
| 2.6 Extrakce bodů..... | 39 |
| 2.7 Vyhodnocení | 40 |
| 3. Problematika měření křivek a obecných tvarových ploch | 40 |
| 3.1 Definování jmenovitého tvaru..... | 41 |
| 3.2 Měření křivek v programu Calypso | 43 |
| 3.2.1 Typy křivek..... | 43 |
| 3.2.2 Získání jmenovitých hodnot křivky..... | 44 |
| 3.2.3 Definování konstrukcí s křivkami..... | 45 |
| 3.2.4 Definování tolerancí pro křivky..... | 46 |
| 3.2.5 Definování strategie pro měření elementů..... | 46 |
| 3.2.6 Charakteristiky pro křivky | 49 |
| 3.2.7 Pracování s výsledky měření křivky..... | 50 |
| 3.5.8 Grafické vyhodnocení odchylky křivky | 51 |



2016

| | |
|--|-----------|
| 4. Ukázkový postup měření obecné tvarové plochy | 52 |
| 4.1 Import modelu a jeho úprava | 52 |
| 4.2 Kalibrace snímacího systému..... | 53 |
| 4.3 Upnutí..... | 55 |
| 4.4 Vyrovnání..... | 55 |
| 4.5 Extrakce bodů..... | 56 |
| 4.6 Vyhodnocení | 61 |
| Závěr | 63 |



Úvod

Vzhledem ke stále se zvyšujícím požadavkům na funkční vlastnosti produktů je potřeba složitějších výrobních programů a je kladen velký důraz na výrobu, která se musí stále zpřesňovat. Pro měření tvaru a dalších požadovaných vlastností vyráběných výrobků trh nabízí mnoho druhů měřidel. Jsou to měřidla, která měří v jedné ose (např. posuvná měřítka), ve dvou osách (např. dílenské mikroskopy), nebo ve třech osách. Poslední jmenovaná měřidla nazýváme souřadnicové měřicí stroje neboli Coordinate Measuring Machines (CMM).

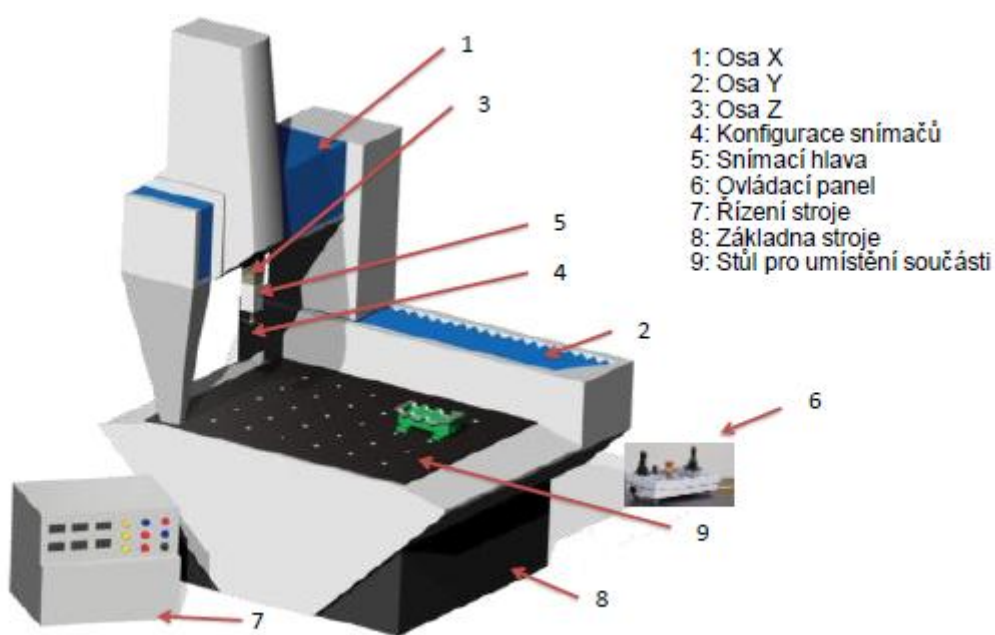
Hlavní funkcí souřadnicových měřicích strojů je komplexní změření obrobku, tedy změření jeho aktuálního tvaru, porovnání s požadovaným tvarem a vyhodnocení metrologických parametrů jako je velikost, tvar apod. Z toho vyplývá, že CMM je velmi využívaný stroj pro kontrolu kvality výrobků, z hlediska rozměrových a geometrických tolerancí. Z důvodu hojného výskytu obecných tvarových ploch, nachází CMM značné uplatnění v měření a kontrole kvality obecných tvarových ploch. Díky širokému spektru využití je CMM univerzální zařízení, umožňující kontrolu kvality, při zachování vysoké produktivity výroby.



1. Obecný popis souřadnicového měřicího stroje

Souřadnicový měřicí stroj je měřicí systém, jehož součástí jsou nástroje pro pohyb snímacího systému se schopností zjistit prostorové souřadnice povrchu obrobku [1]. Typické uspořádání souřadnicového měřicího stroje je zobrazeno na obr. 1.

Mezi nejdůležitější části CMM zahrnujeme pohyblivou konstrukci stroje, odměřovací systém, měřicí hlavu a měřicí software.



Obr. 1 Typické uspořádání CMM [2]

1.1 Konstrukce CMM

Každá konstrukce CMM se skládá ze základny stroje, stolu pro umístění součástí, pohybujících se pilířů, vodících ploch a pinoly. Souřadnicový měřicí stroj by měl splňovat následující požadavky:

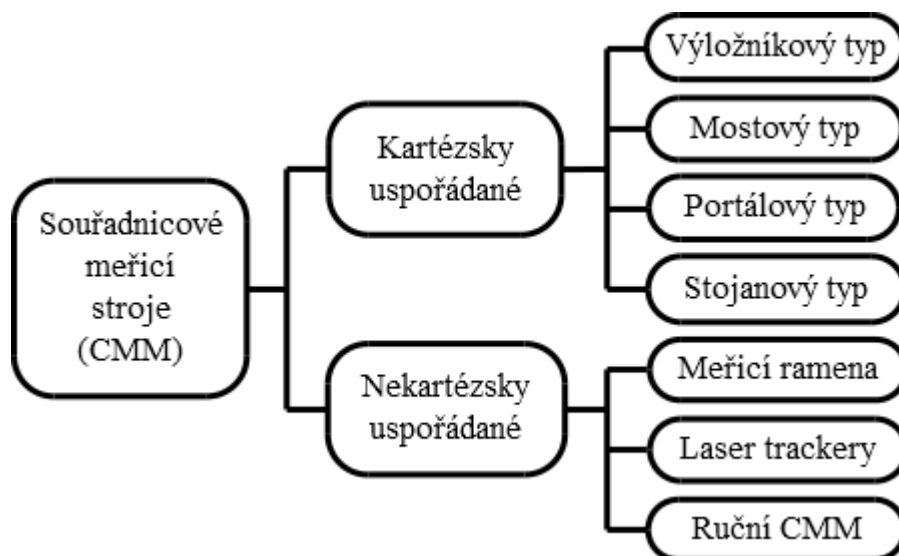
- rozměrová stabilita,
- nízká hmotnost,
- vysoká schopnost tlumení vibrací,



- nízký koeficient teplotní roztažnosti,
- vysoká tepelná vodivost.

Mezi nejvíce používané materiály pro konstrukci CMM patří ocel, granit (žula), slitiny hliníku, keramika a kompozitní materiály. Granit je základním materiálem pro výrobu desky pracovního stolu, neboť je vysoce odolný proti opotřebení a poškrábání. Mezi jeho další výhody patří nízký koeficient teplotní roztažnosti a dobré tlumení vibrací. Naopak nevýhodou je jeho vysoká hmotnost. Dalším konstrukčním materiálem je ocel. Tento materiál se vyznačuje tím, že to nejdostupnější konstrukční materiál. Bohužel jeho nevýhodou je velká hmotnost a teplotní roztažnost. Slitiny hliníku se využívají pro jejich nízkou hmotnost a vysokou odolností proti korozi. Proto je to vhodný materiál pro konstrukce. Keramika je materiál vyznačující se nízkou hmotností, vysokou pevností a teplotní stabilitou. Výraznou nevýhodou je cena tohoto materiálu. Kompozitní materiály jsou hitem posledních let. Jsou vysoce pevné, teplotně stabilní a jejich hlavní předností je jejich výrazně nízká hmotnost. Bohužel cena kompozitních materiálů je v porovnání s ostatními dostupnými konstrukčními materiály velice vysoká. Příkladem kompozitního materiálu jsou uhlíkové kompozitní materiály [2].

Rozdělení souřadnicových měřicích strojů můžeme provést dle několika hledisek. Já jsem si pro rozdělení vybrala hledisko uspořádání souřadného systému. Toto uspořádání je schematicky uvedeno na obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení souřadnicových měřicích strojů [2]



1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM

Stroje tohoto typu pracují na základně kartézského souřadného systému. Tento systém se skládá ze třech na sebe kolmých os, pomocí kterých se měří všechny souřadnice obrobku [3].

Podle normy ISO 10360 – 1 se kartézsky uspořádané souřadnicové stroje rozdělují na základní druhy, které vidíme na obr. 2.

Výložníkový typ CMM

Tato konstrukce CMM se skládá z pohyblivého konzolového ramene, na kterém je umístěn pojezd s pinolou. Nesmírnou výhodou této konstrukce je dobrý přístup k obrobku. Manipulační prostor je otevřen ze tří stran. Výložníková konstrukce nabízí dlouhý stůl s relativně malými měřicími rozsahy s vysokou přesností. Výhodou je také vysoká výkonnost, která se uplatňuje jak ve výrobě, tak i laboratořích pro rychlé proměření součástí. Naopak nevýhodou je prohýbání této konstrukce. Příkladem CMM výložníkového typu je produkt firmy Carl Zeiss – DuraMax na obr.3 [3].



Obr. 3 DuraMax [7]



Obr. 4 MMZ B [7]

Mostový typ CMM

V dnešní době jde o nerozšířenější konstrukci kartézských CMM. Masivní konstrukce vyniká vysokou tuhostí, přesností a velkým měřicím prostorem, proto se nejvíce uplatňuje v automobilovém a leteckém průmyslu např. při měření karoserií



automobilů. Výhodou je, že obsluha stroje má umožněný přístup do celého prostoru souřadnicového měřicího stroje. Příkladem CMM s mostovou konstrukcí je produkt firmy Carl Zeiss – MMZ B, který je zobrazen na obr. 4 [3].

Portálový typ CMM

Tento typ konstrukce kartézsky uspořádaného CMM vyniká svou vysokou pevností a přesností. Používá se pro měření středních a velkých rozsahů měření. Tento typ se vyrábí ve dvou variantách - s pohyblivým portálem nebo s pevným portálem. Konstrukce u provedení CMM s pohyblivým portálem se pohybuje pomocí ložisek po krajích pracovního stolu. Konstrukce u provedení CMM s pevným portálem vyžaduje pohyblivý stůl. Výhodou je vyšší tuhost konstrukce. Naopak nevýhodou pohyblivého stolu je, že se musí pohybovat i s měřenou součástí. Příkladem provedení s pohyblivým portálem je produkt firmy Carl Zeiss – ACCURA 2000 (obr. 5) a provedení s pevným portálem produkt společnosti Hexagon Metrology – Leitz PMM-C (obr. 6) [3].



Obr. 5 ACCURA 2000 [7]



Obr. 6 Leitz PMM-C [4]



Stojanový typ CMM

Tato konstrukce je ideální pro měření např. automobilových dílů. Konstrukce se skládá z nosného sloupu, na kterém je posuvně upevněno horizontální rameno, na jehož konci je umístěna snímací hlava. Pro měření velkých součástí z obou stran se využívá dvou synchronně měřících souřadnicových strojů této stojanové konstrukce. Rychlost a přesnost měření závisí na velikosti měřené součásti. Výhodou této konstrukce je dobrá přístupnost snímací hlavy ke všem stranám měřené součásti. Příkladem stojanové konstrukce je produkt firmy Carl Zeiss – ZEISS PRO, který je zobrazen na obr. 7 [3].



Obr. 7 ZEISS PRO [7]

1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM

Jak je uvedeno na obr. 2 dalším typem souřadnicových měřících strojů jsou CMM s nekartézsky uspořádaným souřadným systémem. Tyto stroje pracují s ostatními druhy souřadných systémů, jako jsou např. cylindrické, sférické.

Pro realizaci měření v tomto souřadném systému se využívá různých způsobů – měření pomocí kloubových ramen, měření založené na triangulaci, měření pomocí sférického souřadného systému či měření využívající měření vzdálenosti charakteristických bodů z několika referenčních bodů [3].

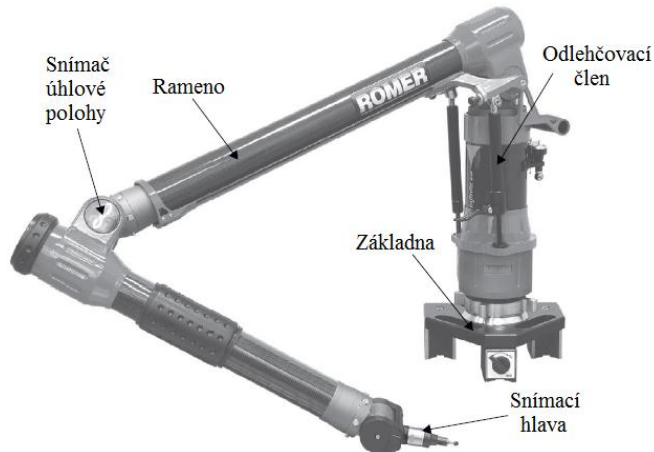
Měřicí ramena

Měřicí ramena jsou přenosné souřadnicové měřící stroje, které umožňují provádět měření přímo ve výrobním prostředí. Jsou jednoduché a zaručují spolehlivé 3D měření. Pracují s tzv. sférickým souřadným systémem. Při natažení celého měřícího ramene můžeme ve všech směrech opsat polokouli. Typická konstrukce měřícího ramene je uvedena na obr. 8. Prodloužení ramene bývají vyrobená z lehkého materiálu, jako jsou uhlíkové kompozity nebo slitiny hliníku. Měřicí ramena lze vybavit různě



dlouhými sondami a skenery pro měření i těžko dosažitelných bodů buď opticky, nebo dotykově [4].

Na obr. 9 je zobrazeno měřicí rameno ROMER Absolute ARM od společnosti Hexagon Metrology.



Obr. 8 Typická konstrukce měřícího ramena [3]



Obr. 9 ROMER Absolute ARM [4]

Laser trackery

Měření ve sférickém souřadném systému se provádí též pomocí laser trackerů. Laser tracker je mobilní měřicí zařízení, které sleduje polohu odrazového systému z určité vzdálenosti. Skládá se z laserového interferometru, dvou přesných úhlových senzorů polohy (enkodérů) a softwaru pro výpočet, ukládání a zobrazení polohy odrazového systému (reflektoru). Co se týče přesnosti, spolehlivosti a odolnosti mobilních souřadnicových měřících strojů, je tento typ na úplném vrcholu. Laser trackery umožňují efektivní řešení úloh při měření rozměrných dílů přímo ve výrobním prostředí, které lze jen s obtížemi měřit klasickými dotykovými metodami. Najdou uplatnění v automobilovém či leteckém průmyslu, v energetice, v těžkém strojírenství [5]. Příkladem laser trackeru je Leica Absolute Tracker AT402 (obr. 10) od společnosti Hexagon Metrology. Tento mobilní CMM umožňuje extrémní přesnost na malé vzdálenosti [4].



Obr. 10 Leica Absolute Tracker AT402 [8]



Ruční CMM

Tento typ CMM není programovatelný. To znamená, že operátor, který se strojem pracuje, fyzicky přesouvá sondu podél os, aby vytvořil kontakt s měřenou plochou a zaznamenal naměřenou hodnotu. Tato hodnota je pak zobrazena jako digitální údaj. Uložení bývá nejčastěji pomocí vzduchových ložisek. Příkladem ručních CMM je ScanMax (obr. 11) od společnosti Carl Zeiss. Tento souřadnicový stroj je vyvinut přímo pro měření v dílenském prostředí. Je snadno ovladatelný a velice přesný i v drsných podmínkách. Také bych uvedla zCAT (obr. 12) od společnosti Fowler High Precision. Je to první ruční DCC (Direct Computer Controlled) CMM.



Obr. 11 ScanMax [7]



Obr. 12 zCAT

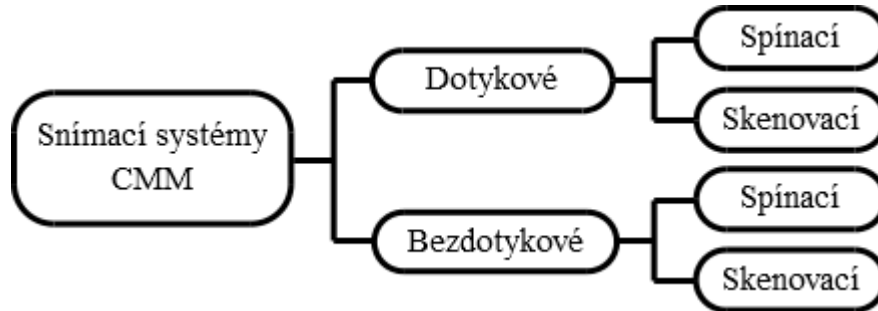
1.2 Snímací systémy

Snímací systém je nedílnou součástí v celém měřicím systému stroje, které tvoří spojení mezi strojem a součástí, kterou máme měřit. Slouží k vyhodnocení polohy bodů nasnímaných na obrobku vzhledem k souřadnicovému systému CMM. Snímací systémy se obvykle vztahují k počtu os, v nichž mohou pracovat. Rozdělujeme je na lineární (1 D), rovinné (2 D) a trojrozměrné (3 D) operační systémy.

Základní rozdělení snímacích systémů CMM je zobrazeno na obr. 13. Hlavice pro upnutí snímače může být pevná nebo otočná. Přičemž platí, že z pevné hlavice nemůžeme udělat otočnou hlavici, ale z otočné pevnou ano.



2016



Obr. 13 Rozdělení snímacích systémů CMM [2]

Pro snímání povrchu obrobku můžeme využívat snímací systémy s interakcemi:

- dotykovými – síla – kontakt s obrobkem je zaznamenán, když síla překročí elektronicky nebo mechanicky řízenou hodnotu,
- elektrickými – odpor, kapacitance, induktance,
- optickými – odraz světla,
- magnetickými.

V dnešní době moderní CMM využívají nejvíce dotykové nebo optické snímací systémy.

Na trhu jsou k dispozici také snímací systémy, které nejsou dotykové ani optické. Interakce s obrobkem může být elektrická, prostřednictvím útlumu harmonického kmitání přerušováním kontaktu nebo prostřednictvím viskozity vzduchu mezi snímacím dotykem a měřeným obrobkem. Tyto snímací systémy jsou obvykle používány pro měření jemných částí a velmi malých prvků [3].

1.2.1 Dotykové snímací systémy

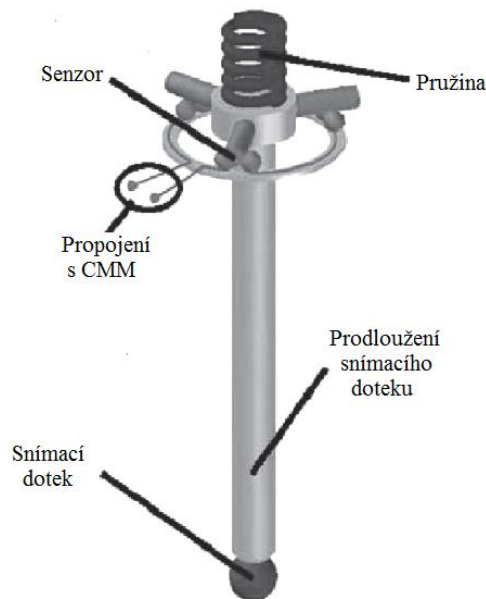
Dotykové snímací systémy potřebují ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem. U dotykových snímacích systémů rozlišujeme spínací (kontaktní sonda) a měřicí (skenovací sonda) snímací systémy. Příklad užití dotykového snímacího systému je uveden na obr. 14.



Obr. 14 Měření dotykovým snímacím systémem [6]

Prvky dotykového snímacího systému

Základní prvky dotykového snímacího systému jsou zobrazeny na obr. 15 [3].



Obr. 15 Dotykový snímací systém [3]

Snímací dotek

Je to součást měřicího systému, který zprostředkovává kontakt mezi součástí a sondou, naváže tedy mechanickou interakci s obrobkem, a způsobí sepnutí mechanismu sondy. Signál, který je přitom generován, umožňuje zaznamenání souřadnic sejmutého bodu. Typ a rozměr doteku závisí na snímaném prvku. Mezi nejdůležitější vlastnosti



doteku patří nejnižší odchylka tvaru, vysoká tuhost a vysoká odolnost proti opotřebení. Proto nejčastěji použitým materiálem pro výrobu doteků je rubín.

Rubínové doteky mají výjimečně hladký povrch, vynikající pevnost v tlaku a vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení. Dalším materiálem pro snímací dotek je nitrid křemíku, který se používá při měření hliníkových dílů skenováním. Mezi rubínem a hliníkem dochází k adheznímu otěru a hliník se následně usazuje na rubínovém doteku. Proto je lepší použít dotek z nitridu křemíku, kde adhezním otěr nevzniká, a tudíž nedochází k usazování hliníku na snímacím doteku. Materiálem používaným pro snímací dotek je také oxid zirkoničitý. Ten je vhodný při měření dílů z litiny skenováním. Vzniká zde abrazivní otěr, který způsobuje výrazné opotřebení snímacího doteku z rubínu [6].

Typy snímacích doteků [6]:

- přímé doteky (obr. 16),
- hvězdicové doteky (obr. 17),
- diskové doteky (obr. 18),
- válcové doteky (obr. 19).
- špička a dutá polokoule (obr. 20).



Obr. 16 Přímý dotek



Obr. 17 Hvězdicový dotek



Obr. 18 Diskový dotek



Obr. 19 Válnový dotek



Obr. 20 Špička a dutá polokoule

Prodloužení snímacího doteku

Prodloužení snímacího doteku neboli dřík přenáší informaci o kontaktu (např. přítlačná síla) ke snímacímu doteku. Mezi jeho vlastnosti patří velmi vysoká tuhost, nízká teplotní roztažnost a malá hmotnost. Mezi materiály používané pro výrobu dříků patří ocel, karbid wolframu, keramika, uhlíková vlákna, hliník a titan [3].

Pružina

Je to prvek pro vyvolání a kontrolování síly definované pro snímání [3].

Senzor

Slouží pro vyhodnocování informací vzniklých při kontaktech s měřenou součástí [3].

Propojení s CMM

Slouží pro přenos snímaných informací do řídicí jednotky, kde se aktivují snímače polohy umístěné na osách CMM [3].

Spínací snímací systém

Tento systém je vhodný pro měření běžných geometrických prvků, kde nemusíme vyhodnocovat odchylku tvaru. Je to sekvenční měření bodů na povrchu pozvednutím sondy mezi dvěma měřeními a dotknutím se znovu v dalším snímaném bodě. Jakmile se snímací dotek dotkne povrchu obrobku, je vyvolán spínací signál. U tohoto systému sbíráme samostatné body. Přednostmi tohoto systému je jeho nízká cena, hmotnost a velikost. Avšak nevýhodou této metody je její dlouhé trvání. Neboť se



musíme opakovaně pro každý snímání bod se sondou přiblížit k povrchu a poté se od povrchu vzdálit.

Skenovací snímací systém

Skenování znamená, že snímací dotek je po celou dobu snímání v kontaktu s povrchem obrobku a snímá body. Počet těchto bodů se může pohybovat až v řádech tisíců. Měřicí snímací systémy měří v dynamickém nebo statickém režimu. U statického režimu dochází ke čtení souřadnic při zastavení stroje. Ve skenovacím režimu můžeme navíc vyhodnocovat kromě rozměrů geometrických prvků také odchylku jejich tvaru. Tahle možnost je velice nezbytná, když předpokládaná odchylka měřeného prvku není zanedbatelná ve srovnání se zadanou tolerancí.

Příklady dotkových snímacích systémů

VAST XXT (obr. 21) společnosti Carl Zeiss je dotkový snímač umístěný v otočné hlavě RDS (obr. 22) schopný snímat měřenou součást skenováním. Otočná hlava je schopna měřit ve všech prostorových úhlech [7].



Obr. 21 VAST XXT



Obr. 22 Otočná hlava RDS

VAST XTR gold (obr. 23) společnosti Carl Zeiss je snímací hlava, která díky integrované rotační ose (otočného kloubu) umožňuje otáčet snímač v krocích po 15 stupních. A společně s polohováním otočné hlavy po 2,5 ° stupně v každé ose umožňuje zjednodušit konfiguraci snímačů. Tato snímací hlava je vhodná pro měření dílů s mnoha



2016

prvky a s mnoha úhlovými polohami např. skříně převodovek pro vrtulníky a lokomotivy [7].



Obr. 23 VAST XTR gold



Obr. 24 VAST gold

VAST gold (obr. 24) společnosti Carl Zeiss je pevná hlava určená pro dotykové snímání jak bodově, tak skenováním. U této pevné hlavy je možné pracovat se snímači dlouhými až 800 mm a vážícími až 600 g [7].

1.2.2. Bezdotykové snímací systémy

Druhým typem snímacích systémů CMM, jak můžeme vidět na obr. 13, jsou bezdotykové snímací systémy. Tento systém nevyžaduje ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem, proto v dnešní době nahrazuje v některých aplikacích dotykové snímací systémy. Výhodami oproti dotykovým snímacím systémům je, že nám umožňují měřit křehké obrobky, vysoká rychlost snímání nám umožňuje nasnímat větší počet bodů a v poslední řadě větším pracovním prostorem se nám snižuje riziko kolize mezi snímacím systémem a obrobkem



Obr. 25 Měření bezdotykovým snímacím systémem [7]



Mezi vyskytující se nevýhody bezdotykových snímacích systémů patří vyšší nejistota měření u každého nasnímaného bodu a nevýhodou je, že výsledky měření mohou být ovlivněny optickými vlastnostmi obrobku a okolního světla. Téměř všechny bezdotykové snímací systémy CMM jsou optické. Optické senzory kombinují prvky optiky, videa a laserové technologie. Jsou to bodové a liniové senzory, jejichž funkce je založena na triangulaci. Příklad měření pomocí bezdotykového snímacího systému je uveden na obr. 25.

Příklady bezdotykových snímacích systémů

PRECITEC Lateral Resolution (obr. 26) společnosti Hexagon Metrology je senzor využívající zaostřené bílé světlo k měření velmi složitých povrchů, křehkých povrchů, měkkých povrchů, matných, reflexních a potahovaných plastů, skla a dalších průhledných materiálů [4]. K měření používá strategie podobné strategiím dotykového snímání. Je využíván pro měření na kratší vzdálenosti. Není vhodný pro měření např. karoserií aut.

HP-C-VE Vision Sensor (obr. 27) od společnosti Hexagon Metrology je kamera pro CMM. Principem této kamery je, že 2D světlo-citlivý CCD snímač a integrované LED osvětlení osvětlují a zobrazují oblast na měřené součásti [4].



Obr. 26 PRECITEC Lateral Resolution [4]



Obr. 27 HP-C-VE Vision Sensor

LineScan (obr. 28) od společnosti Carl Zeiss je optický snímací systém vhodný pro měření karoserií, pro výrobu forem a nástrojů. Tento snímač je schopný celoplošně zachytit tvar a body porovnat s existujícími jmenovitými CAD daty [7].



ViScan (obr. 29) od společnosti Carl Zeiss je optický snímač, který je možné kombinovat s otočnou hlavou RDS (obr. 22). Je vhodný pro měření dílů s velmi malými nebo dvojrozměrnými prvky a dílů z měkkých materiálů (plech, pryž, plast) [7].



Obr. 28 LineScan

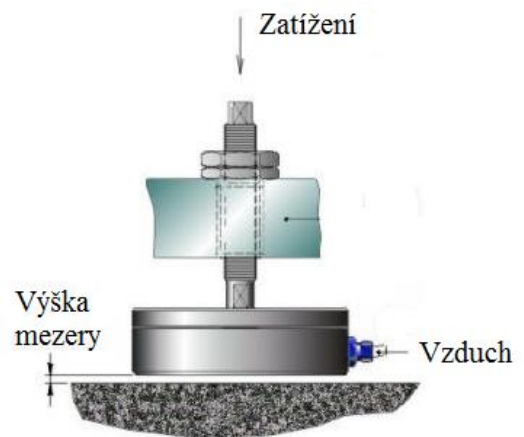


Obr. 29 ViScan

1.3 Uložení pohyblivých částí

Pohyblivé části konstrukce CMM musí být uloženy tak, aby co nejméně ovlivňovaly přesnost měření a mohly se plynule a lehce pohybovat i při minimálních rychlostech. Při ukládání těchto částí musíme brát v úvahu, že musí být uloženy na vedení s co nejmenším možným třením, nejvyšší tuhostí a minimálním opotřebením. Nejběžnějšími typy uložení jsou bezdotykové vzduchové uložení a mechanické uložení [3].

Aerostatické vzduchové uložení (obr. 30) umožňuje pohyb částí CMM po vzduchovém polštáři. Šířka tohoto polštáře je mezi 1 - 10 μm . Mezi výhody tohoto uložení patří nízké tření i při vyšších rychlostech. Problémem u tohoto uložení je čistota vzduchu. Musíme udržovat povrch, po kterém se části pohybují, neustále čistý. Pokud by se zde vyskytovaly nečistoty, mohlo by dojít k poškození vzduchové vrstvy a následně k poškození celého vedení.



Obr. 30 Princip vzduchového uložení [8]



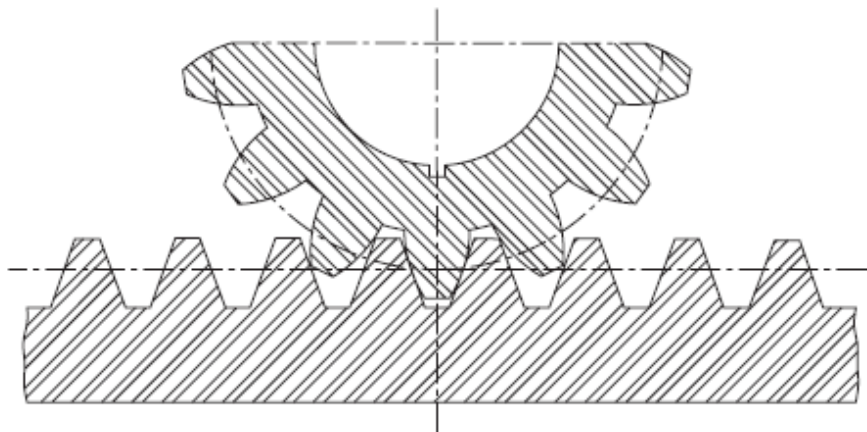
Mezi mechanická vedení patří vedení valivé a kluzné. Valivé vedení je uloženo na válečkových nebo kuličkových ložiskách. Je nejvhodnějším a často využívaným vedením pro CMM. Výhodami je malé tření, vysoká rovnoměrnost pohybů, odolnost proti opotřebení a tuhost. Kluzné vedení vyniká svou vysokou tuhostí. Nevýhodou je velký odpor. Toto vedení je jen pro malé rychlosti posuvů. Musí se neustále mazat. Proto se dnes již téměř nevyužívá.

1.4 Pohony

Účelem pohonného systému je pouze posun sondy. Existuje několik typů pohonných systémů. Jsou to ozubené hřebeny, řemenové převody, třecí převody, vodící šrouby a lineární pohony [3].

Ozubené hřebeny

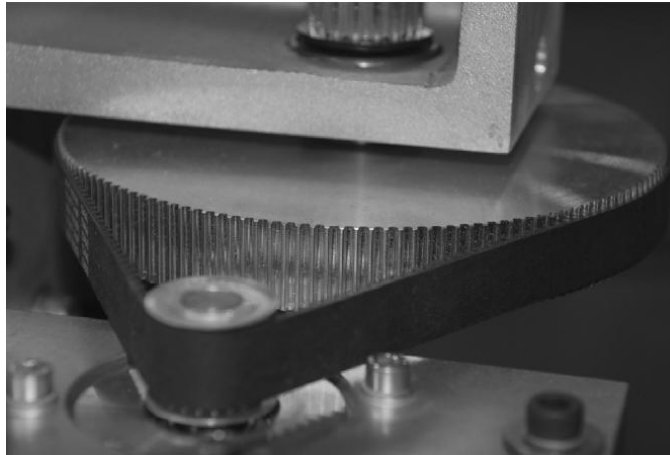
Tento pohonný systém (obr. 31) je nejjednodušší pro vyvolání přímočarého pohybu. Používá se tam, kde je potřeba dlouhá délka pohybu. Největší uplatnění je u mostových typů konstrukcí CMM [3].



Obr. 31 Ozubený hřeben [3]

Řemenové převody

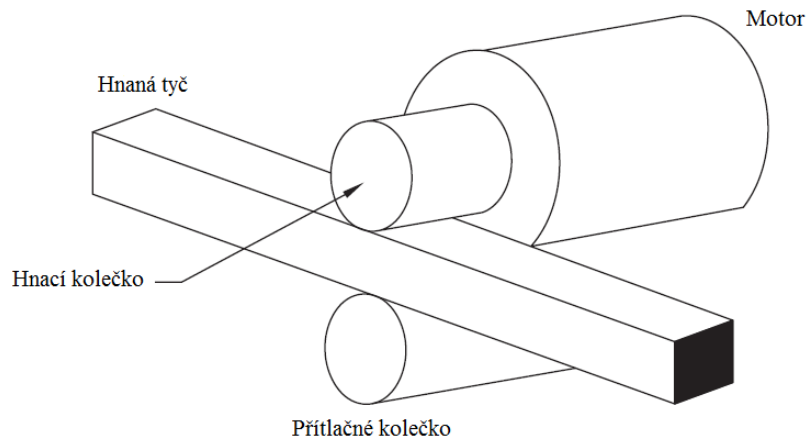
Tyto převody (obr. 32) se skládají z řemene, dvou řemenic, reduktoru pro snížení otáček a zvýšení krouticího momentu a servomotoru. Výhodou u tohoto pohonu je jeho tichý chod a možnost pohybu vysokou rychlostí. Nevýhodou je možnost prokluzu, špatná odolnost vůči vyšším teplotám, vytahování a opotřebení řemenu. Kvůli nepřesnosti tento převod nemůžeme použít u některých operací, např. u skenování.



Obr. 32 Řemenový převod [3]

Třecí převody

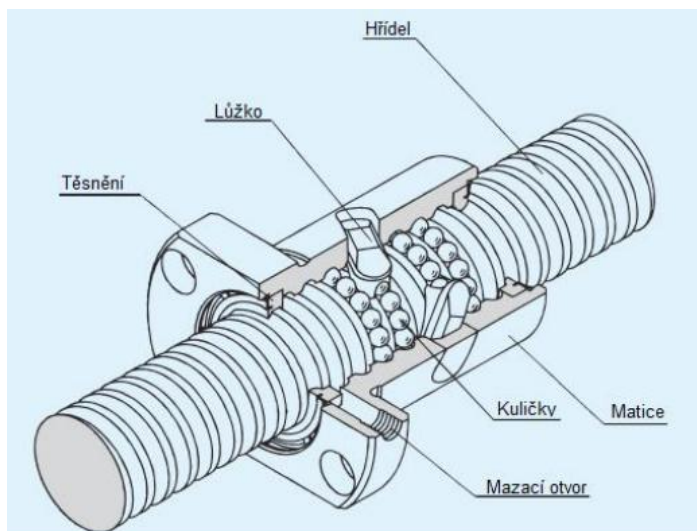
Tento převod (obr. 33) je využíván jen v některých CMM. Skládá se z hnacího kola, ploché nebo kulaté hnané tyče a přítlačného kola. Výhodou je jednoduchost konstrukce, klidný a tichý chod, tlumení rázů. Mezi nežádoucí vlastnosti patří malý výkon a opotřebení.



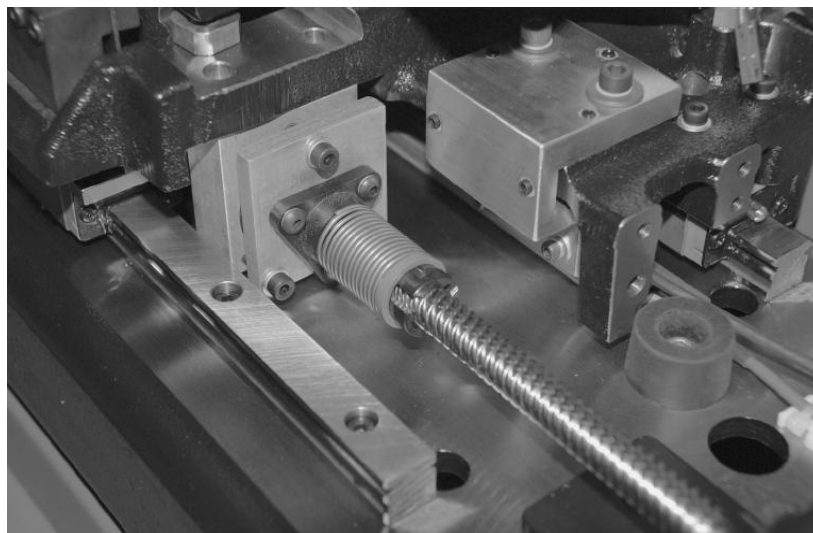
Obr. 33 Třecí převod [3]

Vodící šrouby

Nejčastěji využívaným typem vodících šroubů jsou kuličkové šrouby. Principem tohoto typu je převod rotačního pohybu na pohyb přímočarý pomocí kuliček jako valivých elementů. Poskytují vysokou tuhost a přesnost. Na druhou stranu mohou být hlučné a podléhat opotřebení.



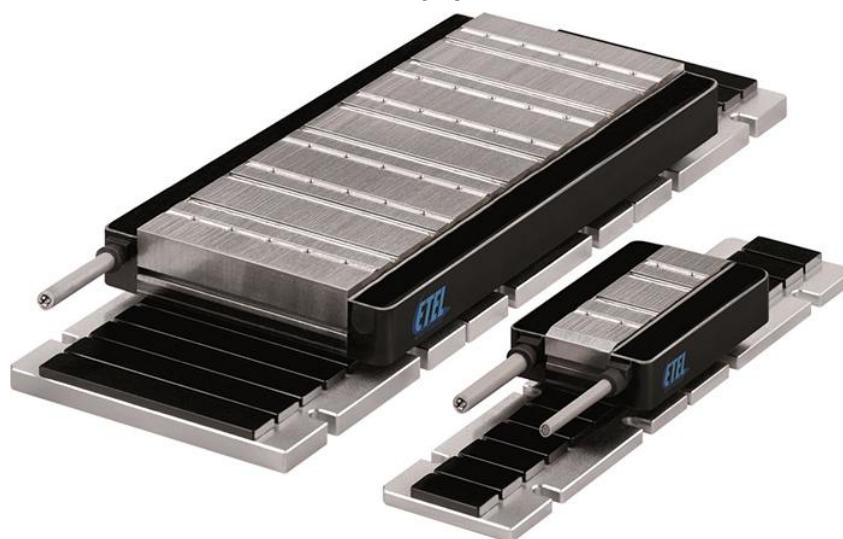
Obr. 34 Provedení kuličkových šroubů [9]



Obr. 35 Kuličkový šroub [3]

Lineární pohony

Lineární pohony (obr. 36) jsou motory s přímým pohonem. Nevykonávají rotační pohyb, ale posuvný pohyb. Nemají převodovku, tudíž zde nejsou žádné mechanické vůle. Výsledkem je vysoká přesnost polohování omezená pouze metodou, která zpětně měří polohu motoru. Dále lineární pohon dosahuje vysokého zrychlení a vysokých rychlostí. Používají se u CMM s mostovou konstrukcí.



Obr. 36 Lineární pohon

1.5 Odměřovací systémy

Odměřovací systém nám umožňuje získat souřadnice snímaných bodů na obrobku v kartézských (polárních) souřadnicích, které mohou být zapsané v analogovém nebo číslicovém tvaru. Základním principem systému je okamžité zaznamenání polohy snímači posuvu na každé ze tří lineárních os souřadnicového měřicího stroje při dotknutí obrobku sondou. Pro získání informace o absolutní poloze musíme na začátku měření získat referenční bod, neboť bychom dostávali jen informaci o posunutí o nějakou vzdálenost. Odměřovací systém tvoří důležitou část CMM, neboť do určité míry ovlivňuje výslednou přesnost měření [3].

Nejzákladnější rozdělení odměřovacích systémů je na přímé a nepřímé odměřování. Přímé odměřování znamená, že odměřovací systémy jsou přímo namontovány na pohybujících se částech stroje. Nepřímé odměřování znamená, že neodměřujeme polohu pohybující se části stroje, ale jen polohu pohybového mechanismu [10].

Dalším hlediskem pro posuzování odměřování je druh signálu, který odměřovací systém poskytuje jako informaci o poloze. Buď je odměřování inkrementální, nebo absolutní. U inkrementálního odměřování dostává řídicí systém informaci ve formě impulzů, které počítá od pevně stanovené polohy, referenční polohy. Po zapnutí stroje musíme nejprve najet do referenční polohy, to znamená do referenčních bodů na všech



osách, aby se nastavil souřadný systém. Až po tomto úkonu je stroj připraven k práci. Absolutní odměřování poskytuje ihned po zapnutí stroje řídicímu systému informaci o poloze os vůči souřadnému systému stroje [10].

Dalším hlediskem pro dělení odměřovacích systémů je fyzikální princip získávání informací o poloze. Zejména se jedná o odměřování indukční, magnetické a optické [10].

Posledním hlediskem rozdělení odměřovacích systémů je konstrukční provedení. Buď jsou systémy lineární, rotační nebo kombinace těchto konstrukcí.

V souřadnicových měřicích strojích se nalézají následující typy odměřovacích systémů [3]:

- optické odměřovací systémy,
- rotační odměřovací systémy,
- indukční odměřovací systémy,
- magnetické odměřovací systémy,
- laserové interferometry.

1.5.1 Optické odměřovací systémy

V zásadě, optický lineární snímač se skládá ze stupnice a opticko-elektrické čtecí hlavy, přičemž jedna z těchto částí musí být připevněna k posuvné části CMM. Vzájemný pohyb mezi těmito dvěma částmi vyvolá informaci o posunutí [3].

Existují tři typy optických stupnic [3]:

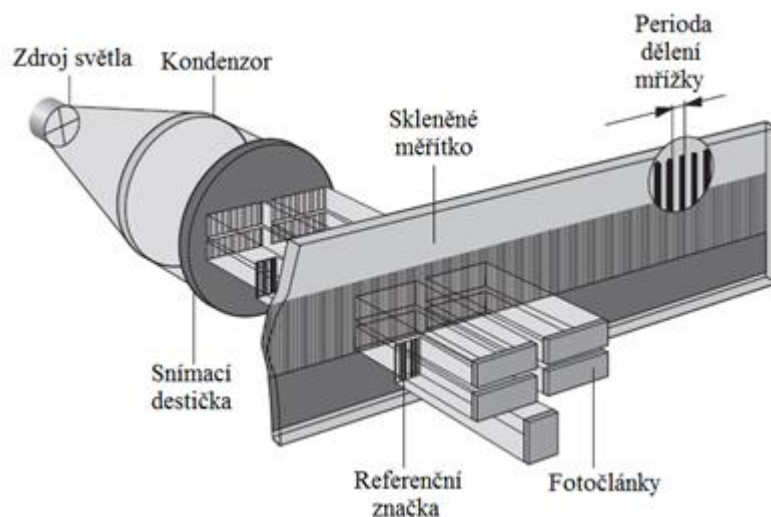
- Prosvětlovací stupnice,
- Odrazová stupnice,
- Interferenční stupnice.



Prosvětlovací stupnice

Měřítka je vyrobeno ze skla a je opatřeno mřížkou, jejíž přesnost je dána roztečí obvykle 50 – 100 čar na milimetr. Mřížka se vytváří napařením velmi tenké vrstvy chromu na skleněný podklad buď přes masku, nebo následným vyškabáním čar. Čtecí hlava obsahuje světelný zdroj, objektiv pro kolimaci svazku světelných paprsků, snímací destičku s mřížkou, na které jsou rysky, a fotobuňky [3].

Na obr. 37 je zobrazen princip fotoelektrického snímání. Snímací hlava obsahuje zdroj světla, který emituje rozbíhavé světelné paprsky, které kolimátor převede na rovnoběžný svazek. Ten prochází skrz snímací destičku a následně skrz měřítka. Když projde světelný paprsek skrz měřítka, dopadá na fotočlánky, které ho zaznamenají a převedou na výstupní signál sinusového průběhu. Jakmile se tedy začne pohybovat snímací hlava vůči měřítka, překrývají se střídavě mezery a rysky mřížky měřítka a snímací destičky. Fotočlánky pak periodicky zaznamenávají změny světla a tmy a vytvářejí elektrické signály [11]. Výstupem jsou dva sinusové signály, které jsou fázově posunuty o 90°. Doba periody je rovná periodě dělení mřížky měřítka. Třetí signál, který vytvoří referenční značka, slouží jako výchozí poloha



Obr. 37 Fotoelektrický princip měření se skleněným měřítka [3]

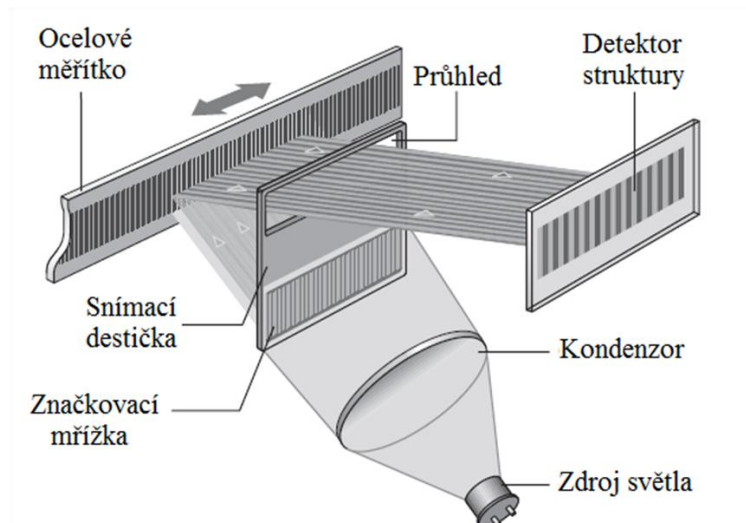
Odrazové měřítka

Odrazové měřítka je vyrobeno z oceli. Interferenční systém je založen na střídajících se ryskách, které zajišťují odraz světelného záření, a mezerách, které záření



2016

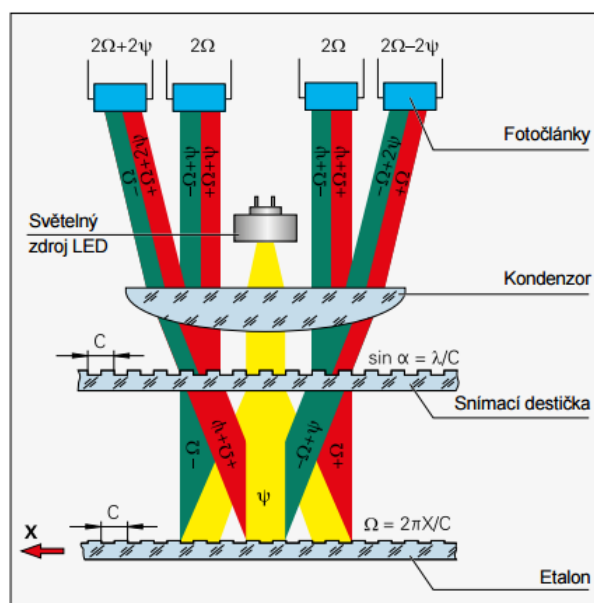
pohlcují. Čtecí hlava obsahuje světelný zdroj, objektiv pro kolimaci svazku světelných paprsků, snímací destičku s mřížkou a fotobuňky. Jakmile se čtecí hlava posune oproti ocelovému měřítku, fotobuňky vytvoří periodický signál podobný tomu, který je vytvořen u skleněného měřítka [3].



Obr. 38 Fotoelektrický princip měření s ocelovým měřítkem [3]

Interferenční měřítko

Měřítko obsahuje mřížku s přesně vyrobenou roztečí 100 a více čar na milimetr. Linky jsou čteny fotoelektrickou hlavou, která zaznamená změny intenzity způsobené interferencí světla odraženého od měřítka a výchozí mřížky ve čtecí hlavě. Výstupem čtecí hlavy jsou vlny ve tvaru sinusoidy. Tyto signály jsou poté elektronicky rozděleny do jemnějšího rozlišení a převedeny do digitální podoby [3].

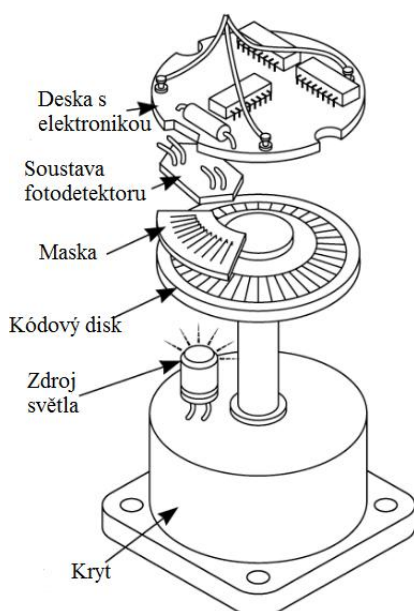


Obr. 39 Princip měření pomocí interference [12]



1.5.2 Rotační enkodéry

Rotační enkodér (obr. 41) je elektromagnetický převodník, který převádí rotační pohyb na sekvence elektrických digitálních impulzů [13]. Slouží ke snímání rotačních pohybů a úhlových rychlostí. Vyrábějí se buď jako absolutní, nebo inkrementální. Výstupem inkrementálních rotačních enkodérů je řada impulzů měnících se podle rotačního posunutí os. Dostaneme informaci pouze o pohybu. Výstupem absolutních rotačních enkodérů je úhel natočení s použitím absolutního kódu. Rotační pozice může být detekována čtením kódu. Dostaneme informaci o poloze i o pohybu. Rotační enkodéry mohou být mechanické, optické (obr. 40) nebo magnetické.



Obr. 40 Princip rotačního optického enkodéru [15]



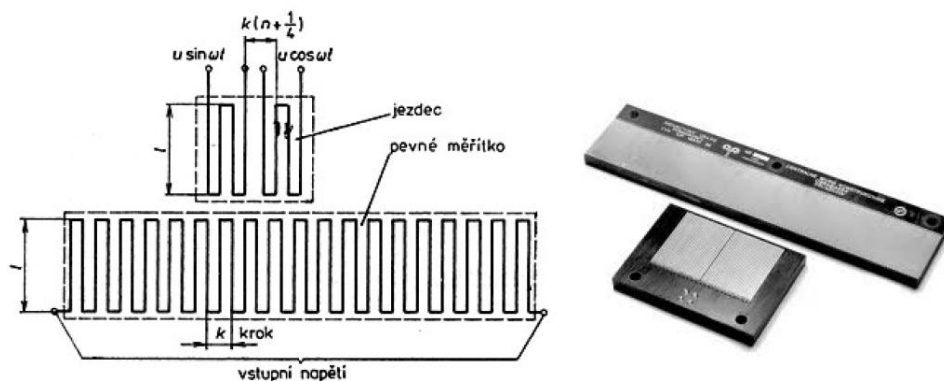
Obr. 41 Rotační enkodéry [26]

Hlavní částí optického rotačního enkodéru (obr. 40) je optický disk, který je klínem spojený se spojovací hřídelí enkodéru, která se otáčí současně s diskem. Před diskem je umístěn zdroj světla, jehož paprsek prochází diskem pouze skrz průhledná okénka. Zbývající část disku je neprůhledná a pohlcuje světlo. Světelné impulzy vytvářené otáčením disku aktivují optický snímač, který je převádí na elektrické impulzy [13].



1.5.3 Induktosynové odměřovací systémy

Induktosynová měřítka jsou měřítka zhotovená formou vodivého plošného spoje na nevodivé fólii, která se lepí na ocelovou podložku ve tvaru desky nebo pásky. Plošný spoj má tvar pravoúhlého meandru, jehož motiv se opakuje po 2 mm. Induktosyn se skládá z pevné části (měřítka) a pohyblivé části (jezdce). Jezdec je umístěn nad měřítkem ve vzdálenosti přibližně 0,1 mm a formou plošného spoje jsou na něm vyleptány dvě posunutá vinutí. Plošný spoj měřítka je napájen střídavým proudem. V jezdcu se indukují napětí, jejichž amplituda se při vzájemném posuvu jezdce a měřítka mění v jednom vinutí dle sinusové závislosti a v druhém vinutí dle kosinusové závislosti. Po zesílení signálů jsou změny amplitud vyhodnocovány a zpracovány v převodnicích nebo indikacích polohy. Výhodou je dobrá rozlišitelnost. Naopak nevýhodou je, že k měřítku i k jezdcu vede kabel [16]. Induktosynové odměřovací systémy se vyrábí jako rotační nebo lineární (obr. 43).



Obr. 42 Lineární inductosyn

1.5.4 Magnetické odměřovací systémy

Každý magnetický snímač se skládá ze dvou základních dílů: malého dvupólového magnetu a čipu s maticí Hallových sond. Sondy v čipu snímají změny magnetického toku při rotaci inicializačního magnetu a vytvářejí Hallovo napětí, jež je úměrné této změně. Hallovo napětí z jednotlivých sond snímací matice je zpracováno dalšími obvody čipu do požadovaného formátu výstupu. Formát výstupního signálu může být analogový, inkrementální i absolutní [17]. Pro lineární odměřování se používají snímače složené ze čtecí hlavy a magnetického pásku (obr. 44). Pro rotační odměřování se používají snímače složené ze čtecí hlavy a magnetického prstence (obr.



45) [6]. Hlavními výhodami magnetických odměřovacích systémů je odolnost vůči vibracím, vysoká rychlost snímání, teplotní odolnost [18].



Obr. 43 Lineární snímač LM15

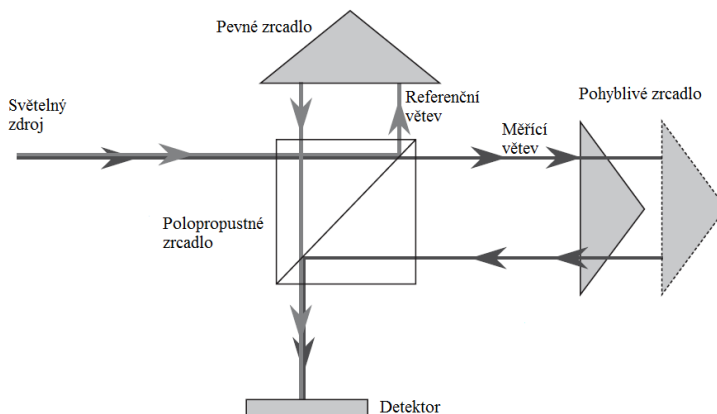


Obr. 44 Magnetický stupnicový snímač LM13 a prsteneček

1.5.6 Laserové interferometry

Laserové interferometry se u CMM moc nevyskytují. Ale jsou důležitou součástí při měření délky. Jsou založeny na principu interference světla. Skládají z laserového paprsku, interferometru a dvou zrcadel. Výhodou je, že tyto stupnice oplývají vysokou přesností. Jejich rozlišení je až $0,01 \mu\text{m}$. Ve srovnání s jinými stupnicemi pro lineární měření je zde cena o dost vyšší.

Interferometr je zařízení, které rozdělí laserový paprsek do dvou paprsků. Jeden je použit jako referenční a druhý měřící paprsek k vytvoření interference s referenčním paprskem. Tento koncept byl sestaven A. A. Michelsonem v roce 1881 a je ilustrován na obr. 45.



Obr. 45 Princip Michelsonova interferometru



Obr. 46 Laserový interferometr XL-80 [6]



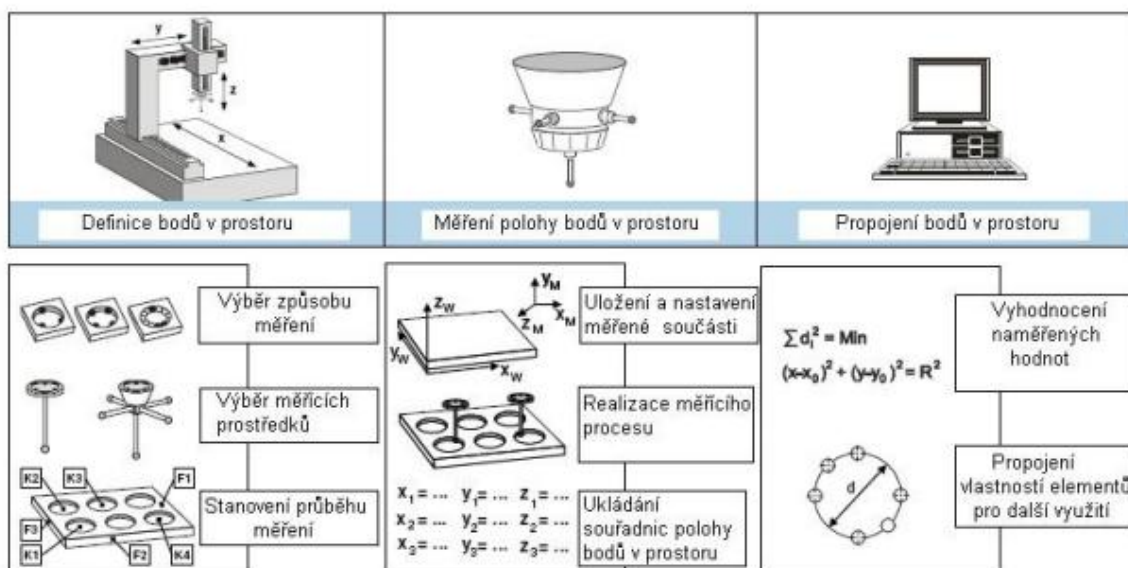
Principem této metody je, že paprsek, který je vyzařován zdrojem monochromatického světla (laseru), je polopropustným zrcadlem rozdělen na dvě větve o stejné fázi – referenční a měřicí. Referenční paprsek se odráží a jde k pevnému zrcadlu, od kterého se odráží a směřuje zpět k polopropustnému zrcadlu. Měřicí paprsek projde k pohyblivému zrcadlu, od kterého se odráží a dopadá zpět na polopropustné zrcadlo. Zde se oba paprsky opět spojí, což způsobí interferenci. Na stínítku se objeví minima a maxima ve formě světlých a tmavých proužků, které pomocí fotodektoru můžeme převést na elektrický signál. Posunem pohyblivého zrcadla se změní velikost dráhy měřicího paprsku. Počítáme-li interferenční proužky a známe-li vlnovou délku, můžeme vypočítat posun pohyblivého zrcadla [1].

Mezi výhody laserových interferometrů patří jejich maximální přesnost a opakovatelnost díky externě umístěným optickým součástem [6].

Laserový interferometr Renishaw XL-80 (obr. 46) je používán k rozsáhlému vyhodnocení přesnosti obráběcích strojů a souřadnicových měřicích strojů (CMM).

2. Princip souřadnicového měření

Jak už jsem zmínila na začátku, hlavní funkcí CMM je změření aktuálního tvaru obrobku, porovnání s požadovaným tvarem a poté vyhodnocení metrologických informací (tvaru, velikosti apod.). Zjednodušeně řečeno aktuální tvar je zaznamenáván pomocí snímacího systému, který nasnímá body nebo plochy na obrobku. Z těchto bodů se pak vytvoří pomocí softwaru analytický model a z něj se vyhodnocují potřebná data. Měření začíná analýzou výkresové dokumentace. Musíme si stanovit, jakým způsobem součást upneme, abychom bez problému naměřili požadované charakteristiky. Dále si musíme kvalifikovat souřadný systém zaměřením polohy kalibrační koule a poté nakonfigurovat snímače. Výsledkem kontroly na CMM je vyhodnocení charakteristik, k němuž musíme nasnímat potřebné elementy.



Obr. 47 Princip měření pomocí CMM [19]

2.1 Analýza výkresové dokumentace

Analýza výkresové dokumentace spočívá ve stanovení charakteristik, které potřebujeme na zadané součásti zkontrolovat. Řídíme se dle geometrických tolerancí (GPS = Geometrical Product Specifications), které jsou sepsány v obr. 48.

| Geometrické tolerance | | Značka |
|-----------------------|---------------------------|--------|
| Tvaru | Přímosti | — |
| | Rovinnosti | ▭ |
| | Kruhovitosti | ○ |
| | Válcovitosti | ⊘ |
| | Tvaru profilu | ⤿ |
| | Tvaru plochy | ⤿ |
| Směru | Rovnoběžnosti | // |
| | Kolmosti | ⊥ |
| | Sklonu | ∠ |
| Polohy | Umístění | ⊕ |
| | Soustřednosti a souososti | ⊙ |
| | Souměrnosti | ≡ |
| Házení | Kruhového | ↗ |
| | Celkového | ↘ |

Obr. 48 GPS



2.2 Snímací systém

V rámci analýzy výkresové dokumentace jsem si stanovila, jaké charakteristiky mám měřit. K měření mohu zvolit dotykový nebo bezdotykový snímací systém. Snímacím systémům se věnuji v kapitole 1.2 Snímací systémy. Proto se jimi dále nebudu zabývat. Pro další popis principu měření na souřadnicovém měřicím stroji jsem zvolila dotykový snímací systém.

2.3 Upnutí součástí

Nejdůležitějším kritériem při upínání součástí je upnout součást tak, aby všechny plochy či prvky určené pro měření byly dostupné. Součást musí být pevně upnuta, aby se při měření nepohnula a tím neovlivnila naměřené výsledky. Při volbě upnutí musíme zvážit sériovost zakázky. Jestli nebude vhodnější než pro upnutí používat stavebnicové upínací přípravky vyrobit jed noučelový přípravek pro upnutí.

První možností je součást upnout pomocí upínacích přípravků na pracovní desku CMM, ve které jsou umístěny otvory se závity. Příkladem jsou upínací stavebnice společnosti Renishaw (obr. 49), které zahrnují široký výběr upínacích desek a upínacích elementů. Upínací desky jsou vyrobeny z hliníkové slitiny a opatřeny teflonovou povrchovou úpravou, která je ochraňuje před poškrábáním a opotřebením. Deska je dodávána s různou velikostí závitových otvorů. Nejběžnější jsou to závity M4, M6 a M8. Polohu upínací desky na pracovní ploše zajistíme pomocí speciálních upínek [6]. Uvedla bych také firmu WITTE a její upínací systém Alufix (obr. 50), který je vyrobený z vysoce tažného hliníku. Tento modulární systém je vyráběný v šesti velikostech, které se dají vzájemně kombinovat. Mezi výhody systému Alufix patří vysoká přesnost všech jeho komponent, lehkost přípravků, systém nepodléhá korozi a má dlouhou životnost [20].

Dalším příkladem je účelově vyrobený upínací přípravek. Mezi výhody této techniky upnutí obrobku patří nízká časová náročnost. Pokud se rozhodneme tuto metodu použít, měli bychom se postarat o to, aby vše bylo řádně čisté, součást byla korektně umístěna, aby při upnutí součásti nedocházelo vlivem sil ke zkřivení a

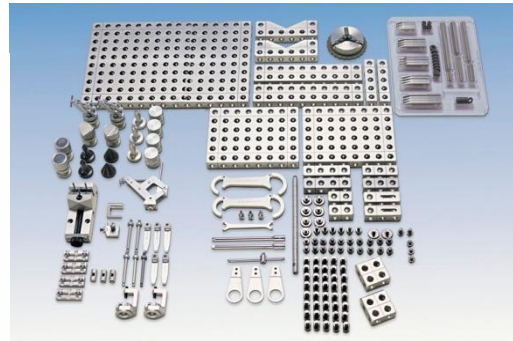


2016

v poslední řadě aby všechna místa určená ke změření byla přístupná. Výhodou je tužší upnutí. Naopak nevýhodou je vyšší cena.



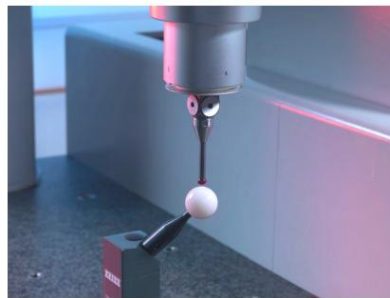
Obr. 49 Upínací sada firmy Renishaw



Obr. 50 Upínací přípravky Alufix

2.4 Kalibrace snímacího systému

Kvalifikace snímacího systému spočívá v zaměření polohy kalibrační koule (obr. 51) referenčním snímačem a následná konfigurace (kalibrace) snímačů zvolených pro snímání. Kalibrovat znamená, že snímač snímá kalibrační kouli a z výsledků jsou zjištěny hodnoty korekce snímače.



Obr. 51 Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem [21]

Kalibrační koule CMM se rozumí koule se známým průměrem, která je dřívkem spojená s měřicím stolem. Pro určení její polohy potřebují referenční snímač. Tyto snímače jsou obvykle značeny červenou tečkou. U skenovacích a spínacích hlav jsou tyto snímače vertikální, jejichž délka a průměr rubínové kuličky jsou známy. Průměr kuličky bývá 8 mm. Kalibrační koule je nutné snímat referenčním snímačem vždy, když došlo ke změně její polohy, k tepelné změně od posledního určení polohy nebo když stroj najížděl do referenčního bodu. Kalibrační koule jsou vyráběny o průměrech 10 –



50 mm pro snímací dotekovou kuličku o průměru 3 mm. Nejčastějším výrobním materiálem je keramika s nízkou tepelnou roztažností a vysokou tvrdostí a pevností.

Posledním bodem je konfigurace snímačů určených pro dané měření. Kalibrace se provádí, pokud jsme instalovali nový snímací systém, který není ještě kalibrován nebo pokud chceme provést opětovnou kalibraci snímacího systému např. po tepelných změnách. Pro kalibraci systému si musíme vybrat režim podle toho k jakému účelu a jakou metodou se má provádět kalibrace snímače. Metody závisejí na typu snímacího systému a na předcházejících kalibracích (tab. 1)

Tab. 1 Seznam kalibračních metod [22]

| Režim | Použití | Průběh |
|---|--|--|
| Tenzor (standard pro měřicí snímací hlavy) | Určení (statického) tenzoru. Tenzor zachycuje průhyb snímače v závislosti na použité síle. | 30 snímání na 15 bodech koule. Každý bod se měří se dvěma odlišnými silami. Z rozdílů je určen statický tenzor |
| Dyn. tenzor (pouze s opcí VAST Navigator) | Určení statického a dynamického tenzoru. Dynamický tenzor charakterizuje průhyb snímače v závislosti na rychlosti scannování. | Na kalibrační kouli se měří tři velké kružnice jednou s rychlostí 5 mm/s a jednou s rychlostí 50 mm/s, je stanoven vzájemný poměr výsledků. Podrobnosti viz návod k obsluze Option VAST Navigator oddíl „Dynamická kalibrace snímačů“. <i>Upozornění:</i> Dynamický tenzor může být určen jen, pokud je již znám statický tenzor. Pokud ještě nebyl určen statický tenzor, je zde automaticky určován nejprve statický a potom dynamický tenzor |
| 6 bodů (standardní pro spínací snímací hlavy) | Prvotní určení geometrie snímače. Může se použít pro všechny snímací hlavy s kulovými snímacími elementy (kromě pasivních snímačů). Nevhodná metoda pro velmi krátké snímače a speciální | Pro určení polohy se snímají nejprve čtyři body a potom šest bodů pro kalibraci snímače. <i>Upozornění:</i> Tato kalibrace se provádí v „aretovaném“ režimu. <i>Pozor!</i> U scannovacích hlav |



2016

| | | |
|-----------------|--|--|
| | konfigurace snímačů (např. šikmé uspořádání). | je tento režim potřebný pouze pro speciální měřicí úlohy. Může být spojen s určitým malým snížením přesnosti. |
| Manuální | Pro manuální souřadnicové měřicí stroje vždy. Jinak jen, pokud není možná automatická kalibrace (např. kvůli geometrii dřívku). Také pro kalibraci teplotního senzoru nebo pro prvotní kalibraci válcového snímače nebo talířkového (diskového) snímače. | Snímané body si vybereme sami. První snímaný bod slouží pro zjištění směru snímání. Z následných snímání se vypočte geometrie snímače (výsledky jsou možné od pátého snímání). |

První kalibrace doteků musí být provedena manuálně. Jakmile je snímací dotek poprvé zkalibrován, další kalibrace jsou již automatické. Nejprve jsou zvolené body nasnímané pomocí referenčního snímače a poté se tato strategie opakuje na každý snímač, který budeme používat k měření.

Kalibrace má vliv na výsledky všech následujících měření a proto musí být zajištěna co nejmenší nejistota. Proto těž hodně závisí na čistotě povrchu kalibrační koule a snímacího doteku. Výsledná směrodatná odchylka by se měla pohybovat v řádech několika mikrometrů. Tato odchylka závisí na následujících několika faktorech:

- rozlišení a přesnost souřadnicového stroje,
- délka a tuhost snímače,
- kvalita konfigurace snímačů,
- kvalita zakončení snímače,
- čistota okolního prostředí.

Pokud se nám výsledná hodnota směrodatné odchylky nelíbí, tak bychom pro zlepšení výsledků měli zkontrolovat stabilitu konfigurace snímače, její správné sestavení, očistit kalibrační kouli, snímače a měření opakovat.



2.5 Vyrovnání součásti

Pojem vyrovnání je používán pro stanovení souřadného systému součásti. Pro určení souřadného systému součásti upnuté na pracovním stole existuje mnoho postupů. Pro názornou ukázkou této problematiky jsem zvolila postupy, které využívá program Calypso.

Pro stanovení polohy součásti musí být souřadný systém definován ve všech šesti stupních volnosti. Těleso může rotovat kolem třech os (3 rotační stupně), které jsou na sebe kolmé a tvoří kartézsky uspořádaný souřadnicový systém značený X – Y - Z a dále může konat posuv ve všech třech těchto osách (3 translační stupně) [22].

Nejčastější definice souřadného systému probíhá následujícím způsobem. Pro stanovení hlavního směru prostorové osy změříme na součásti nějaký geometrický element. Geometrický element by měl být trojrozměrný např. rovina, válec nebo kužel. Určením hlavního směru odebereme součásti dva stupně volnosti – 2 rotační stupně. Pro odebrání posledního rotačního stupně volnosti změříme na součásti dvojrozměrný prvek např. přímku. Pro odebrání 3 translačních stupňů volnosti musíme určit počátek souřadného systému všech tří os X – Y – Z. Ten určíme měřením elementů dle konkrétního dílu [22].

Dále můžeme stanovit souřadný systém metodou 3D připasování. Tuto metody můžeme použít pro početní vyrovnání součástí, pro které nejsou definovány jednoznačně vztažné elementy. Nejčastěji se tato metoda využívá pro měření volných tvarů. Pro stanovení můžeme použít neomezené množství bodů i geometrických elementů definovaných v CAD modelu. Pomocí 3D připasování můžeme tyto body a elementy optimálně připasovat do jejich jmenovité geometrie.

Dalším způsobem definování souřadného systému v programu Calypso je metoda RPS. Metoda má 2 varianty – RPS 321 a RPS volný tvar. Metoda RPS 321 není vhodná pro měření volných tvarů. Vyrovnání touto metodou funguje podle pravidla 3 – 2 – 1. Metoda vychází z bodů se jmenovitými souřadnicemi určenými minimálně třemi a naopak maximálně šesti elementy. Pro nastavení souřadného systému určujeme, které souřadnice elementu jsou pevné, a které volné. Zde je jedna souřadnice třikrát dána



pevně, druhá souřadnice dvakrát a třetí jedno [23]. Metoda RPS volný tvar je vhodná pro definování souřadného systému součástí s volným tvarem. Naměřené body jsou projektovány na jmenovitou rovinu, která je určena jmenovitým bodem a normálou. Pro vyrovnání u RPS volný tvar se používá iterace, neboli opakování měření ve smyčce několikrát po sobě a postupně se výsledky zpřesňují, a tím se i zpřesňuje umístění snímaných bodů na měřeném tělese [23].

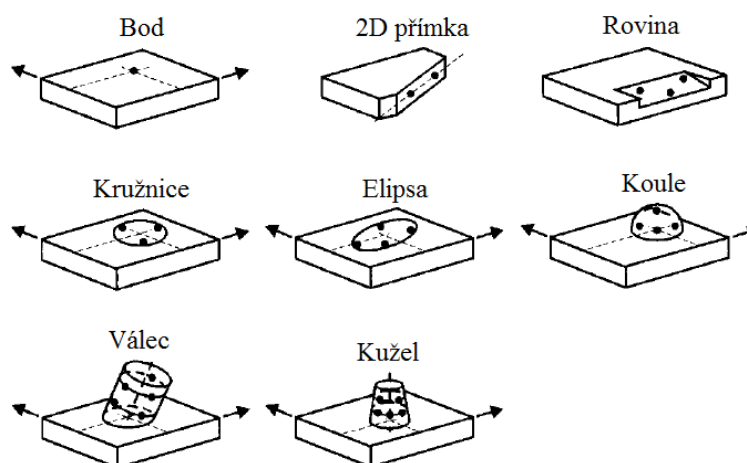
Posledním způsobem definování souřadného systému v programu Calypso je metoda P6, která je vhodná zejména pro vyrovnání trubek. Prvním bodem definují počátek v X, Y a Z. Společně s druhým bodem definují hlavní osu. Třetí bod definuje otáčení kolem hlavní osy [22].

2.6 Extrakce bodů

Souřadnicové měření rozeznává dvě skupiny měřených součástí. První skupinou jsou součásti tvořené obecnými tvarovými plochami. Druhou skupinou jsou součásti tvořené jednoduchými geometrickými elementy, jako je například kružnice, rovina, válec. Pro určení geometrických prvků musíme na součásti nasnímat minimální počet bodů (tab. 2). Software Calypso dokáže po několika dotycích snímacím systémem automaticky vyhodnotit, o jaký tvar se jedná.

Tab. 2 Minimum potřebných bodů pro nasnímání geometrických elementů [22]

| Element | Minimální počet snímání: |
|-----------------|---------------------------------|
| bod | 1 |
| 2D přímka | 2 |
| rovina | 3 |
| bod symetrie | 2 |
| kružnice | 3 |
| válec | 5 |
| kužel | 6 |
| koule | 4 |
| torus | 7 |
| rovina symetrie | 4 |
| elipsa | 5 |
| obdélník | 5 |
| podélný otvor | 5 |



Obr. 52 Geometrické elementy sestavené z minima bodů

2.7 Vyhodnocení

Vyhodnocení probíhá na základě porovnání naměřených dat s požadovaným tvarem součásti. Z nasnímaných bodů se pomocí softwaru vytvoří analytický model a z něj získáme potřebná data pro vyhodnocení rozměrových a geometrických tolerancí. V softwaru Calypso jsou vyhodnocené výsledky uváděny v protokolu. Pro rychlé znázornění, zda naměřené hodnoty jsou nebo nejsou v toleranci, je v rámečku uvedená charakteristika barevně zbarvena. Je-li rámeček červený, znamená to, že charakteristika není v toleranci. Když je rámeček zeleně zbarvený, charakteristika je v toleranci. Dalšími možnostmi zobrazení vyhodnocených výsledků je grafické znázornění, výpis bodů apod. [22].

3. Problematika měření křivek a obecných tvarových ploch

Mnoho výrobků tvoří povrch, který je kombinací jednoduchých geometrických prvků, jako je rovina, válec, koule atd. Tyto prvky jsou nezbytné pro funkci většiny mechanických součástí. Avšak v aplikacích, kde je funkčnost dána například vzájemným působením s vodou, nejsou vhodné [24].

Volně tvarovaný povrch můžeme definovat jako tvar, který nemůže být popsán jednoduchými matematickými výrazy [25].



2016

Volně tvarované povrchy hrají důležitou roli v automobilovém průmyslu (karoserie), v leteckém průmyslu (lopatky turbín, rotory, aerodynamické části), v domácnosti (vodní čerpadla, ventilátory), ve spotřební elektronice (mobilní telefony, zubní kartáčky, holicí strojky) a jiné [48].

Pro měření těchto povrchů jsou identifikovány na způsoby:

- přímé srovnání,
- nepřímé srovnání.

Přímé srovnání

Principem této metody je zkontrolování stupně odchylky mezi povrchem a vzorovou šablonou. Mezeru mezi povrchem a šablonou můžeme měřit pomocí mikroskopu. Tato metoda se nevyznačuje velkou přesností, také je pomalá a k realizaci potřebujeme specializované vybavení [48].

Nepřímé srovnání

U této metody je fyzická vzorová šablona nahrazena počítačovým 3D geometrickým modelem součásti. Principem metody je vyhodnocení stupně odchylky mezi měřeným povrchem a počítačovým modelem, CAD modelem. Pro měření můžeme využít několika technik. Já se budu dále zabývat měřením volných povrchů pomocí souřadnicových měřicích strojů [48].

3.1 Definování jmenovitého tvaru

Křivky a obecné tvarové plochy jsou zásadní pro popis tvarově složitých součástí. S nástupem počítačové grafiky přišel i rapidní vývoj v oblasti počítačové geometrie. Dnes je jmenovitá geometrie obecného tvaru definována CAD modelem.

Obecné tvary jsou popisovány parametrickými plošnými reprezentacemi. Nejběžněji užívanými jsou Bézier, B-spline a NURBS (NeUniformní Racionální B-Spline) reprezentace. CAD systémy jsou založené na popisu složité geometrie využitím NURBS reprezentace křivek a ploch.

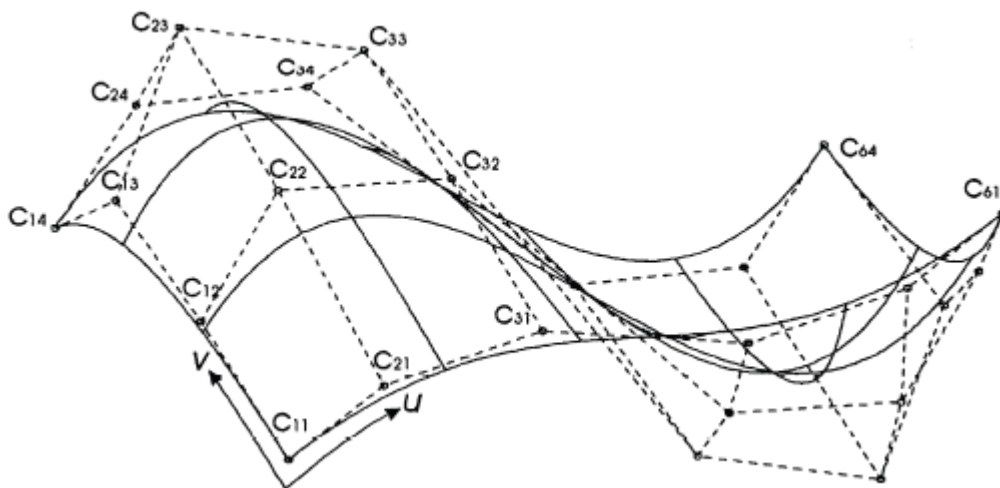


NURBS jsou neuniformní racionální B-spliny. B-spliny jsou segmentované křivky složené z oblouku známých Bézierových křivek a splňující podmínky C^2 spojitosti. U racionálních B-splinů je každému řídicímu bodu přiřazen parametr vypovídající o jeho vlivu na tvar křivky. Parametru říkáme váha a nabývá nezáporných reálných hodnot. Když vzdálenosti mezi body, ve kterých dojde k napojení segmentů (těmito bodům říkáme uzly), nejsou stejné, mluvíme o neuniformních racionálních B-splinech [25]. NURBS plochy přímým zobecněním NURBS křivek a jsou definovány jako:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) \cdot B_{vj}(v) \cdot w_{ij} \cdot c_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) \cdot B_{vj}(v) \cdot w_{ij}} \quad [1]$$

kde:

- p je bod na povrchu a u a v parametry identifikující polohu bodu p na povrchu,
- n_u a n_v je počet řídicích bodů ve směru u a v ,
- $B_{ui}(u)$ a $B_{vj}(v)$ jsou B-splínové báze funkce,
- c_{ij} jsou řídicí body s příslušnými váhami w_{ij} [24].



Obr. 53 Příklad NURBS reprezentace [24]



3.2 Měření křivek v programu Calypso

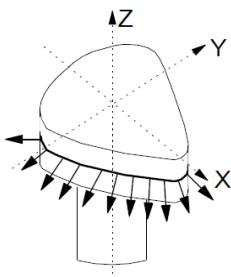
Měření pomocí křivek je speciální technika měření pomocí níž můžeme měřit obecné tvarové plochy.

Křivka je numericky definována konečnou množinou hodnot. Pro plynulé zobrazení křivky se interpoluje mezi body křivky funkce spline. Jmenovité i naměřené hodnoty jsou definovány 6 hodnotami [26]:

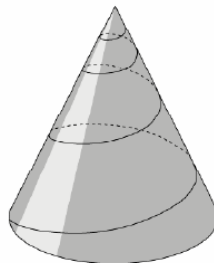
- 3 souřadnice bodu (X, Y, Z),
- 1 normálový vektor (U, V, W) nebo jeho tři směrové kosiny (N_X, N_Y, N_Z).

3.2.1 Typy křivek

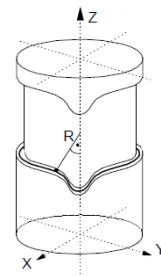
Program Calypso může měřit a vypočítat následující 3 typy křivek [26].



Obr. 54 Rovinná křivka



Obr. 55 Prostorová křivka



Obr. 56 Axiální křivka zdvihu s odchyškami ve směru osy Z

Rovinná křivka (2D křivka)

Rovinné křivky (obr. 54) vznikají řezem (pomyslné) roviny s tělesem. Nacházejí se většinou na součástech s dvourozměrnými křivkovými tvary, např. na vačkových hřídelích. Všechny body 2D křivky leží v jedné rovině, která může ležet libovolně v prostoru. Normálové vektory bodů křivky leží též v rovině měření. Pomocí elementu 2D křivka měříme rovinné řezy těles [26].



Prostorová křivka (3D křivka)

Prostorové křivky (obr. 55) mají tři stupně volnosti, nejsou teoreticky omezeny v žádném rozměru. Nejdůležitější prostorovou křivkou je šroubovice. Pomocí 3D křivky měříme volně tvarované plochy [26].

Křivka zdvihu

Křivky zdvihu (obr. 59) jsou zvláštní 3D křivky, které probíhají na plášti válce. Každý bod křivky zdvihu lze popsat dvěma hodnotami [26]:

- úhlem otočení na ploše válce,
- odchylkou křivky od kruhové linie v určitém směru (např. radiální nebo axiální).

3.2.2 Získání jmenovitých hodnot křivky

Vytvoření jmenovitých hodnot křivky pomocí digitalizace

Digitalizace se používá, pokud ještě nemáme k dispozici jmenovité hodnoty pro křivku. Jmenovité hodnoty křivky získáme pomocí řady snímaní, tedy zachycením neznámé kontury. Snímání by se měla provádět na součásti, která byla velmi přesně vyrobena a může sloužit jako vzorový kus. Naměřené hodnoty získané snímaními jsou poté přepočteny na hodnoty jmenovité. S použitím vzorového kusu tak získáme jmenovité hodnoty pro další křivky se stejným průběhem. Pro snímání si můžeme vybrat dva postupy. Buď můžeme průběh křivky určit jednotlivými manuálními snímaními, nebo můžeme požadovanou křivku skenovat [26].

Převzetí jmenovité hodnoty křivky z CAD modelu

Jmenovité hodnoty pro určitou křivku můžeme také převzít z CAD modelu. V programu Calypso v menu *CAD* klikneme na *Modifikovat CAD elementy* a ukáže se nám okno *Modifikovat CAD model*. Pro vygenerování 2D křivky zvolíme linii na CAD modelu a zvolíme požadovaný počet bodů. Vygeneruje se nám 2D křivka, která je převzata do plánu měření. Pro vygenerování 3D křivky navolíme na CAD modelu










plochu, kde má ležet daná křivka. Vybereme jednu či více hran, zvolíme požadovaný počet bodů a vytvoříme křivku. Ta je opět převzata do plánu měření [26].

3.2.3 Definování konstrukcí s křivkami

Některé elementy na součásti nemůžeme snímat, např. střed otvoru, řez dvou elementů. Můžeme je však vypočítat z elementů, které mohou být snímány. V Calypsu můžeme využít různých typů konstrukcí. Calypso nabízí pro křivky tyto konstrukce [26]:

- Minimum-souřadnice,
- Maximum-souřadnice,
- Řez - průnik křivek s jinými měřenými elementy (tab. 3).

Tab. 3 Možné elementy pro řez s křivkou [26]

| Element protíná... | | 2D křivku: | 3D křivku: |
|--------------------|---|---|--|
| 2D přímka |  | Průsečíky křivky s rovinou 2D přímky | Průsečíky křivky s rovinou 2D přímky |
| 3D přímka |  | Průsečíky křivky s přímkou projektovanou do roviny křivky | – |
| Rovina |  | Průsečíky křivky s rovinou | Průsečíky křivky s rovinou |
| Rovina symetrie |  | Průsečíky křivky se středovou rovinou | Průsečíky křivky se středovou rovinou |
| Kružnice |  | Průsečíky křivky s pláštěm příslušného válce | Průsečíky křivky s pláštěm příslušného válce |
| Válec |  | Průsečíky křivky s osou válce nebo s pláštěm válce | Průsečíky křivky s osou válce nebo s pláštěm válce |
| Kužel |  | Průsečíky křivky s osou kužele projektovanou do roviny křivky | – |

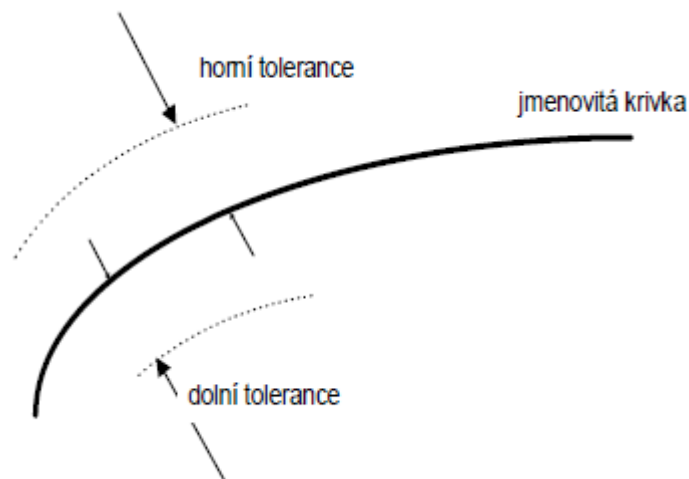


3.2.4 Definování tolerancí pro křivky

V předloze pro definici křivky můžeme definovat tolerance následujícím způsobem [26]:

- zadat tolerance pro celou křivku,
- zadat ručně tolerance pro segmenty,
- načíst tolerance pro segmenty ze souboru,
- vypočítat lineární tolerance pro body křivky,
- definovat toleranci skoku křivky pro celou křivku.

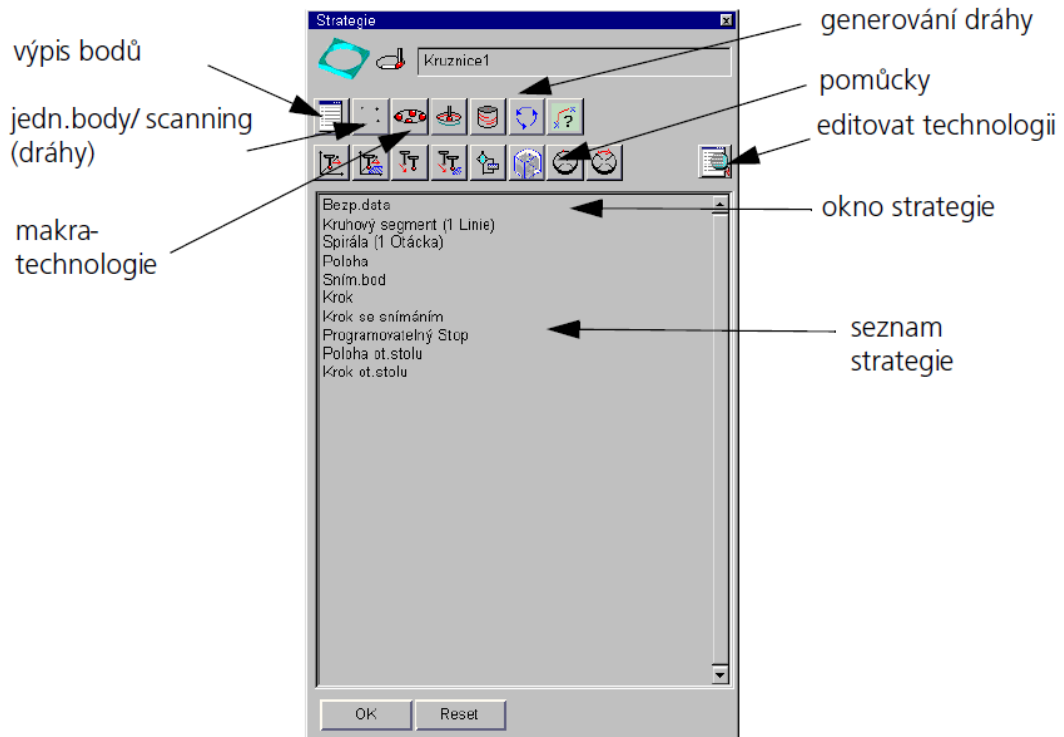
Rozměrové tolerance se vztahují na porovnání jmenovitých a skutečných hodnot bodů křivky. Můžete zadat horní a/nebo dolní toleranci (obr. 57) [26].



Obr. 57 Definování tolerance křivky

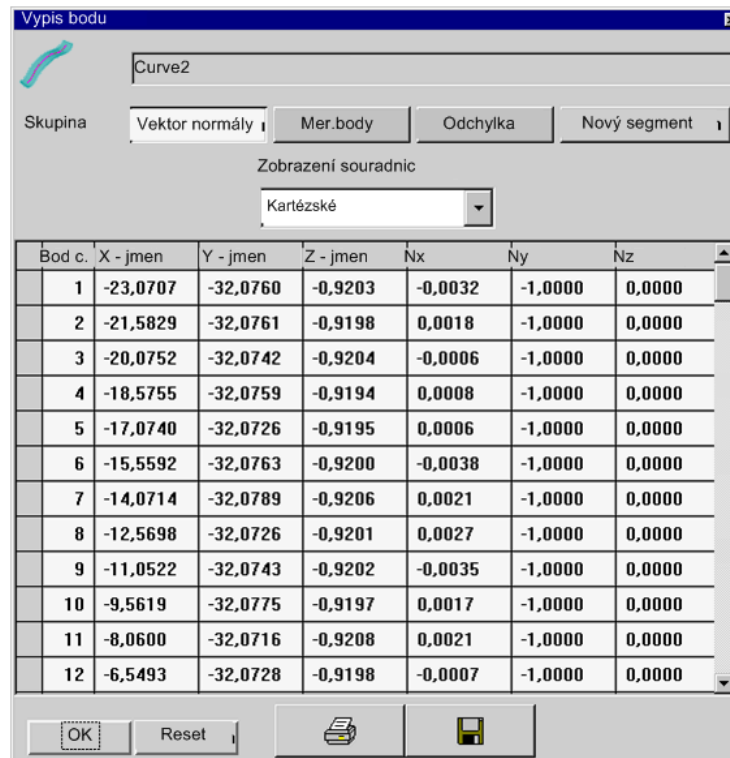
3.2.5 Definování strategie pro měření elementů

Obecně strategie měření jsou všechna přídavná určení, která slouží k docílení optimálního výsledku měření určitého elementu. V jednom plánu měření se může vyskytovat několik strategií [22]. Správa strategií pro měřený element se provádí v okně *Strategie*. Toto okno se neliší od okna *Strategie* pro ostatní měřené elementy (obr. 58).



Obr. 58 Okno Strategie na příkladu elementu kružnice [22]

Jediná změna je u výpisu bodů. *Výpis bodů* křivky má rozšířenou funkčnost v sekci *Skupina*. Jak je uvedeno na obr. 59.



Obr. 59 Výpis bodů křivky



Každý jmenovitý bod křivky je vždy uváděn se svým číslem a souřadnicemi X, Y, Z. Pomocí tlačítek *Vektor normály*, *Měřené body* a *Odchylka* rozhodneme, které informace mají být dále uvedeny [26]:

- *Vektor normály*: Každý jmenovitý bod je uveden společně se směrovými složkami normálového vektoru,
- *Měřené body*: Každý jmenovitý bod je porovnáván se zjištěným naměřeným bodem. Nejsou-li ještě k dispozici žádné měřené body, jsou měřené body zobrazeny s hodnotou nula.
- *Odchylka*: Každý jmenovitý bod je zobrazen spolu s odchylkou měřených bodů ve směru normálového vektoru a jeho směrovými složkami.
- *Vytvořit segment*

Postup definování metody skenování se pro křivky se nepatrně liší od definice pro ostatní metody skenování. Musíme nejprve definovat části křivky, které chceme skenovat. Definice skenování je rozdělena na tři kroky [26]:

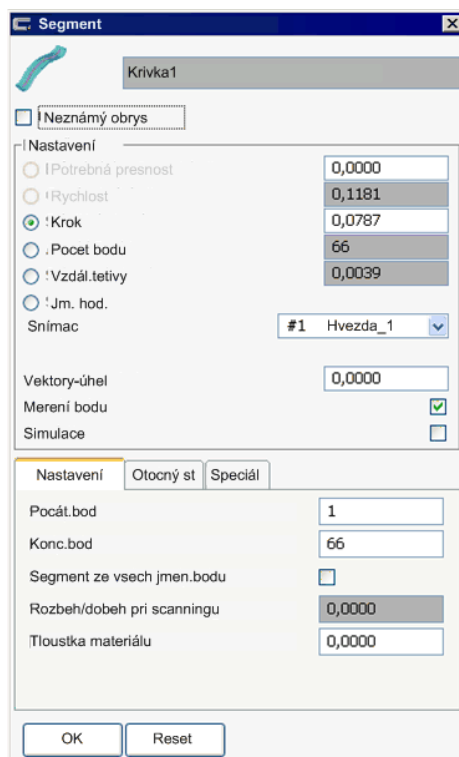
- provést obecných nastavení - tato nastavení jsou společná pro všechny metody skenování,
- definovat segmenty - máme dvě možnosti pro definování segmentu existující křivky:
 - zadání počátečního a koncového bodu (po sobě jdoucí body),
 - zadání jednotlivých bodů (volné zadání),
- zkontrolovat parametry pro danou metodu skenování.

Pro skenování křivek můžeme využít následujících metod skenování (obr. 60) [26]:

- známý obrys – segment má vždy definovaný počáteční a koncový bod,
- zadání úhlu – pro každý bod musíme definovat určitý úhel otočného stolu,
- neznámý obrys – musíme definovat pojezd a koncové kritérium.








2016



Obr. 60 Okno pro zadání skenování křivek









3.2.6 Charakteristiky pro křivky

Na křivkách je možné kontrolovat některé obecné charakteristiky (obr. 61) a speciální charakteristiky určené pouze pro křivky (obr. 62).

| Charakteristika | Povel menu | Popis |
|-----------------|--|---|
| Hodn-X |  Rozměry → Standardy | Určí polohu těžiště křivky ve směru X. |
| Hodn-Y |  Rozměry → Standardy | Určí polohu těžiště křivky ve směru Y. |
| Hodn-Z |  Rozměry → Standardy | Určí polohu těžiště křivky ve směru Z. |
| Odstup bodu |  Rozměry → Vzdálenost jakož i Tvar-Poloha → Vzdálenost | Určí vzdálenost prostorového bodu nebo bodu sítě vztáženou na jeho jmenovitou hodnotu. |
| Tvar |  Tvar-Poloha | Z extrémních hodnot měřených elementů určí úchylku tvaru jako rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou kolmo k měř. elementu. |

Obr. 61 Obecné charakteristiky [26]



| Charakteristika | Povel menu | Popis |
|-------------------|--|---|
| Tvar profilu |  Tvar-Poloha | Pomocí charakteristiky „Tvar profilu“ kontrolujete úchytku tvaru křivky vzhledem ke jmenovité geometrii. DIN tvar profilu je analogický k DIN profilu plochy (viz in der Bedienungsanleitung zum Basis-Modul). |
| Stoupání křivky |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „stoupání křivky“ (strmost křivky) kontrolujete u křivky výškový rozdíl mezi dvěma určitými body křivky nebo rozdíl mezi specifikovanou a dosaženou výškou. |
| Zdvih křivky |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „zdvih křivky“ kontrolujete axiální a radiální odchylky křivky zdvihu. |
| Vzdálenost křivek |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „vzdálenost křivek“ kontrolujete vzdálenost dané křivky od jiné křivky. |
| Rozměr křivky |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „rozměr křivky“ kontrolujete protažení křivky ve specifikovaném směru. |
| Délka křivky |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „délka křivky“ kontrolujete délku křivky. |
| Plošný obsah |  Rozměry → Speciální rozměry | Pomocí charakteristiky „plošný obsah“ kontrolujete obsah plochy uzavřené 2D křivky. |
| Tvar křivky |  Tvar-Poloha | Pomocí charakteristiky „tvar křivky“ kontrolujete dodržení tvaru celé křivky nebo jednotlivých segmentů. |

Obr. 62 Speciální charakteristiky [26]

3.2.7 Pracování s výsledky měření křivky

Na rozdíl od většiny ostatních předloh pro měřené elementy zde můžeme provádět další operace s aktuálními výsledky. Pro vyhodnocení výsledků měření máme následující možnosti [26]:

- výpočet a zobrazení odchylek,
- optimalizace souřadného systému přizpůsobením,
- přizpůsobení naměřených hodnot do jmenovitých,
- definování nebo omezení přizpůsobení,
- definování vyhledávací vzdálenosti,
- vyhlazení zobrazení křivky,
- třídění měřených bodů,
- vyjmutí měřených bodů z vyhodnocení,
- eliminace odlehlých hodnot,
- přidání offsetu k výsledkům,



2016

- nastavení výpočtu odchylek pro závity,
- určený souřadného systému připasováním několika křivek.

Calypso provádí automatické připasování při kontrole tvaru u pravidelných geometrických elementů. Důvodem je, že nepřesné souřadné systémy vedou k nepřesným naměřeným hodnotám. A ty dávají při porovnání jmenovitých a naměřených hodnot nesprávné úchyly tvaru. Připasování je ukázáno na příkladu v praktické části této práce.

3.5.8 Grafické vyhodnocení odchylky křivky

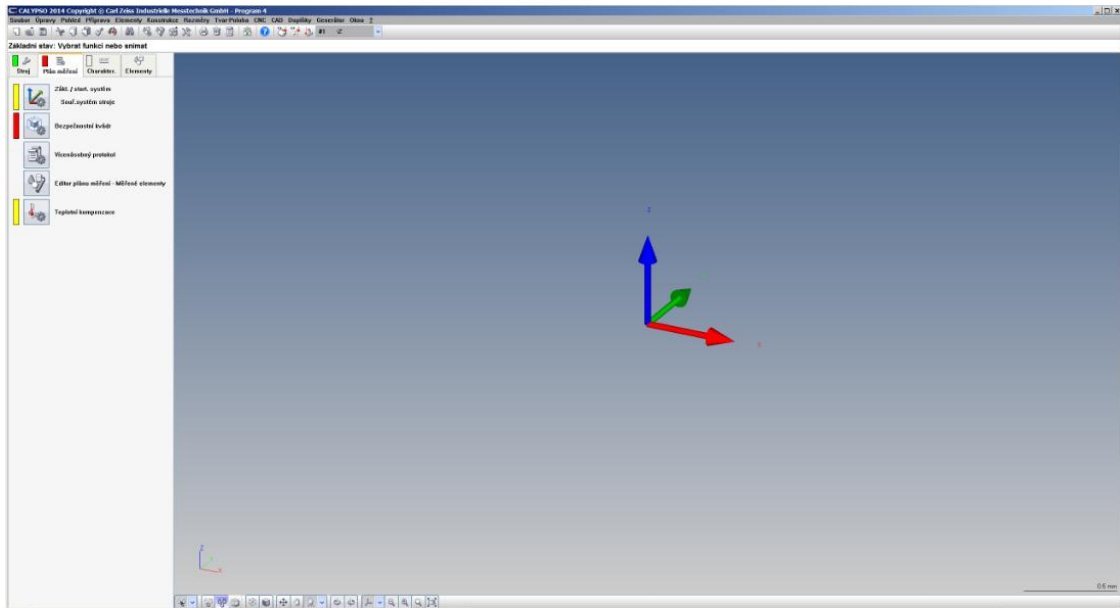
Pro grafické vyhodnocení křivky jsou dvě možnosti [26]:

- výstup grafiky přes charakteristiku,
- výstup s pomůckou Grafika-element.



4. Ukázkový postup měření obecné tvarové plochy

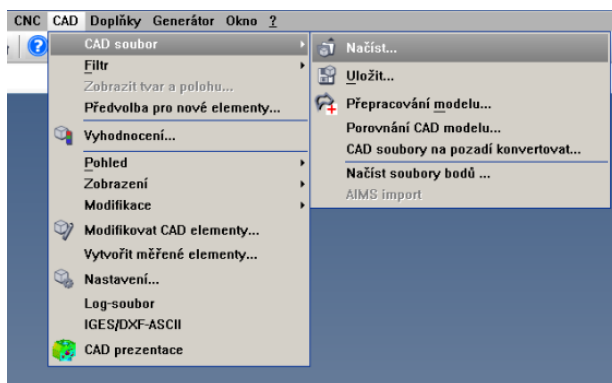
Ukázku měření obecné tvarové plochy jsem provedla na vzorku čočky po operaci frézování. Čočka je vyrobena z polymethylmethakrylátu. Pracovala jsem se softwarem Calypso a samotné měření jsem provedla na souřadnicovém měřicím stroji UMC 1000.



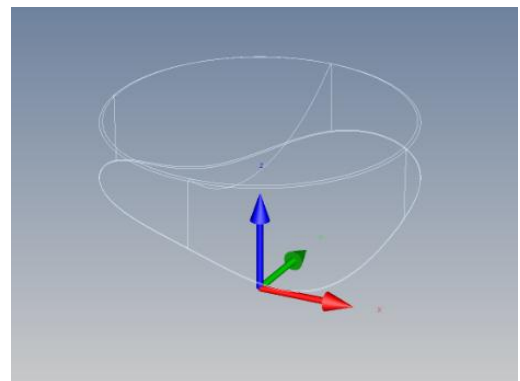
Obr. 63 Úvodní obrazovka

4.1 Import modelu a jeho úprava

Pro svoji aplikaci nemám výrobní dokumentaci. Jednalo se o před sériový kus. Dokumentace byla ve formě CAD modelu. Prvním krokem sestavení měřicího programu v softwaru Calypso bylo načtení CAD modelu měřené součásti do programu (Obr. 64).



Obr. 64 Postup načtení CAD modelu

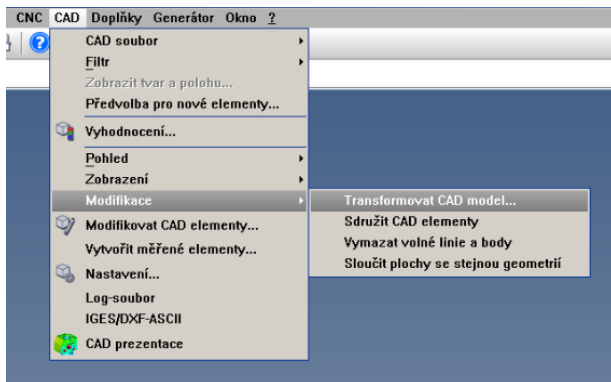


Obr. 65 Načtený CAD model

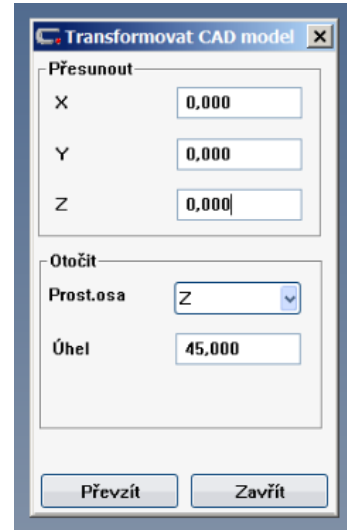


2016

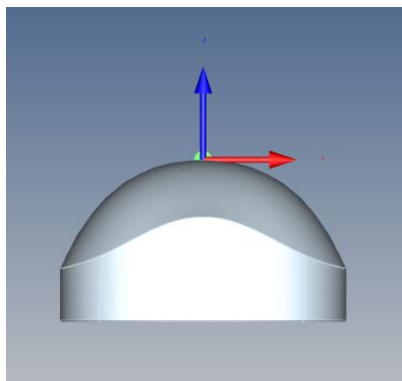
Pro snadnější orientaci jsem přistoupila k transformaci. Transformace se užívá z důvodu návaznosti na snímače, abychom se lépe orientovali a neměli zmatek. Postup transformace je uveden na obr. 66. V tabulce uvedené na obr. 67 jsem postupně natačela osy kolem prostorové osy. Nejprve jsem zadala natočení osy Y o 180° a poté osy Z o 45° . Po této transformaci směry a osy souřadného systému součásti a souřadného systému stroje souhlasily (obr. 68).



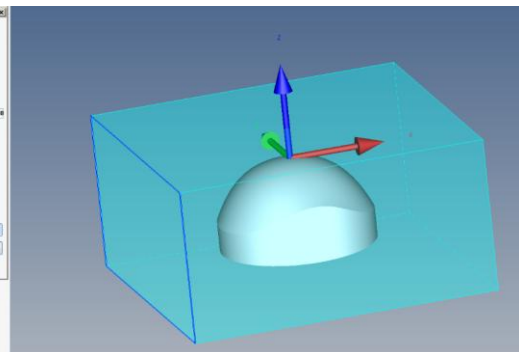
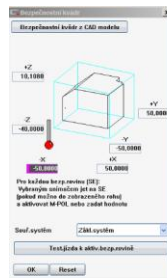
Obr. 66 Postup transformace CAD modelu



Obr. 67 Tabulka transformace CAD modelu



Obr. 68 Transformace os modelu



Obr. 69 Bezpečnostní kvádr

Model jsem také využila k nadefinování bezpečnostního kvádru, který je zobrazen na obr. 69. Bezpečnostní odjezdová vzdálenost bude 10 mm. mm.

4.2 Kalibrace snímacího systému

V dalším bodě jsem provedla kalibraci snímacího systému. Pomocí tlačítka manuální výměna snímače jsem upnula do souřadnicového stroje referenční snímač (obr. 70) a zaměřila jsem polohu kalibrační koule (obr. 71). Před zaměřením jsem pomocí čidel provedla teplotní kompenzaci kalibrační koule. Ta byla $23,56^\circ\text{C}$.



2016

Zaměření polohy kalibrační koule probíhalo při síle 200 mN a dynamickém zatížení 100 %.



Obr. 70 Referenční snímač



Obr. 71 Kalibrační koule



Obr. 72 Snímač

V dalším kroku jsem si nakonfigurovala snímač, který jsem použila k vlastnímu měření. Opět pomocí tlačítka manuální výměna snímačů jsem upnula snímač, který jsem používala ke snímání. Použila jsem dotykový snímací systém s průměr rubínové kuličky je 3 mm (obr. 72). Vlastní kalibrace proběhla při síle 100 mN a dynamickém snímání 50 % z důvodu menšího průměru kuličky a menšího průměru dříku. Výsledky kalibrace vlastního snímače jsou uvedeny na obr. 73.

| Snímač | | Kalibrační koule | |
|--------|---------|------------------|------------|
| Název | Datum | Č. | Tepl. |
| 1_Dolu | 7.6.16 | 1 | 23,5700 |
| R: | 1,4998 | S.Ě. | 12849 |
| S: | 0,0003 | Datum | 7.6.2016 |
| X: | -0,2911 | R: | 14,9996 |
| Y: | -0,1238 | S: | 0,0004 |
| Z: | 18,7667 | X: | 518,1231 |
| Typ: | HSS | Y: | -1673,3847 |
| | | Z: | -642,2348 |
| | | Nakl: | 135,0000 |
| | | Otoč: | 45,0000 |

Obr. 73 Kalibrace snímače



4.3 Upnutí

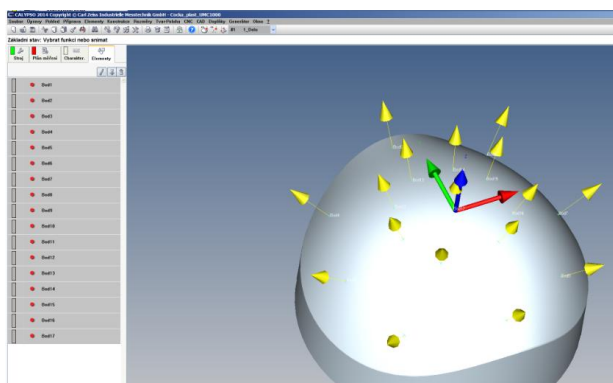
Dalším krokem je upnutí součásti, které je zobrazeno na obr. 74. Upnutí probíhalo ve spolupráci s Ing. Vladimírem Šulcem. Použili jsme upínací systém Alufix od firmy WITTE. K upnutí jsme použili základní desku, upínky a dva šrouby pro připevnění k pracovní desce souřadnicového stroje.



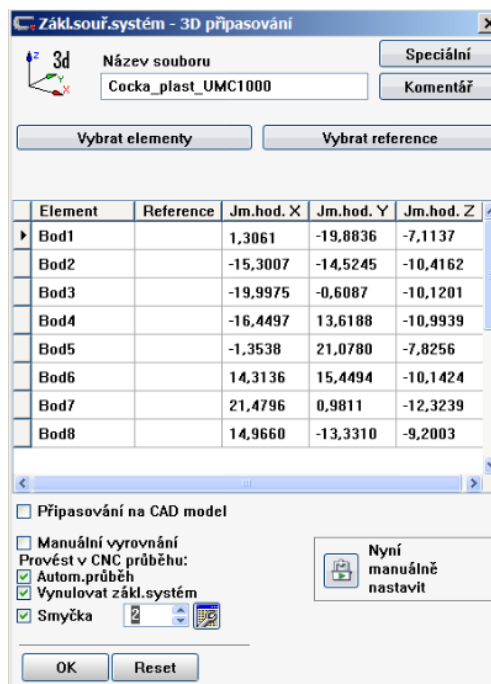
Obr. 74 Upnutí měřené součásti

4.4 Vyrovnání

Dalším bodem je vytvoření souřadného systému. Pro vytvoření jsem si na 3D modelu nadefinovala prostorové body, které jsem se snažila rovnoměrně rozmístit po celé součásti. Tento krok je zobrazen na obr. 75. V záložce základní souřadný systém jsem vybrala pro vytvoření souřadného systému metodu 3D připasování. V elementech jsem vybrala všechny nadefinované prostorové body. Zatrhla jsem, že chci měřit 2 měření, a potvrdila jsem (obr. 76).



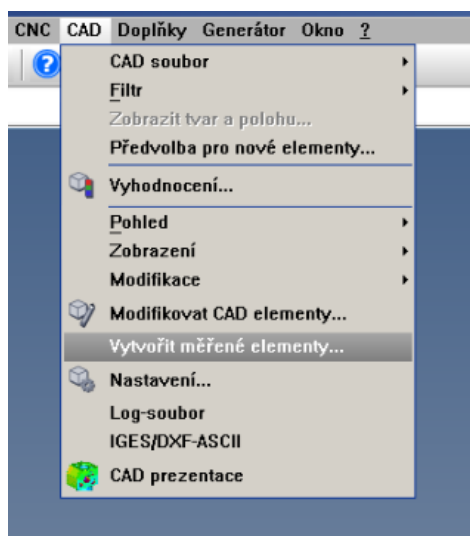
Obr. 75 Definování prostorových bodů



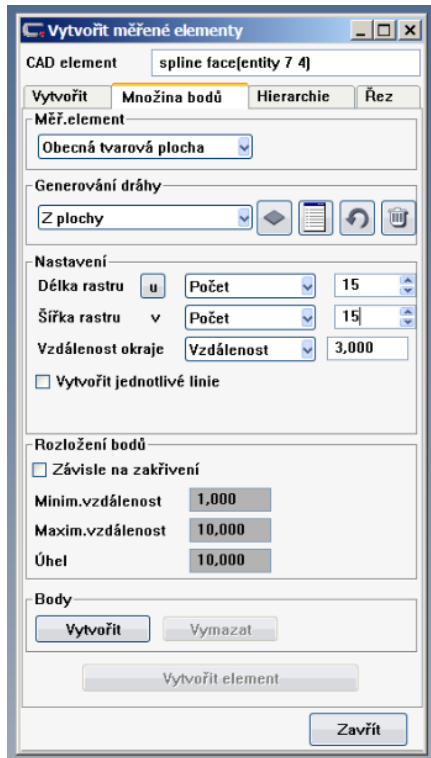
Obr. 76 Základní souřadný systém - 3D připasování

4.5 Extrakce bodů

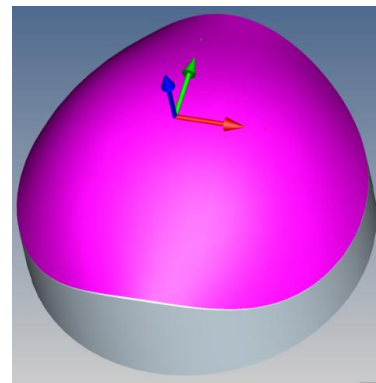
Prvním krokem bylo vytvoření obecné tvarové plochy. V záložce CAD jsem vybrala možnost vytvořit měřené elementy (obr. 77). V záložce množina bodů (obr. 78) jsem vybrala jako měřený element obecnou tvarovou plochu. Generování dráhy z plochy a vybrala jsem plochu, kterou jsem chtěla měřit (obr. 79). Opět v záložce Množina bodů (obr. 78) jsem si nastavila rastr 15x15 a vzdálenost od okraje 3.



Obr. 77 Postup vytvoření měřeného elementu

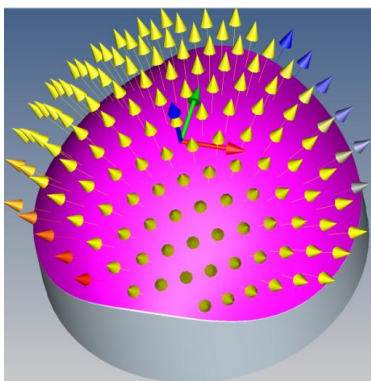


Obr. 78 Záložka množina bodů

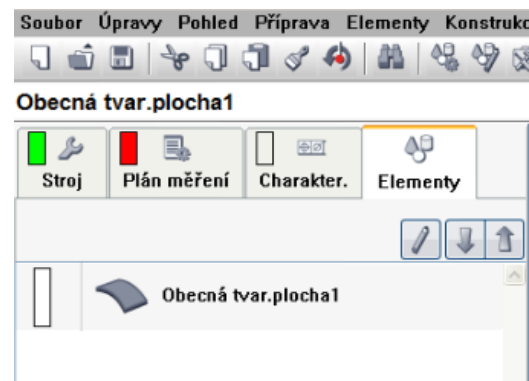


Obr. 79 Měřená plocha

Po tomto nastavení jsem klikla na položku *Body Vytvořit* a na vybrané měřené ploše (obr. 79) se mi vytvořily body (obr. 80). Následně jsem klikla na položku *Vytvořit element* a v záložce *Elementy* se mi vytvořil element *Obecná tvarová plocha* (obr. 81).



Obr. 80 Vytvoření bodů na vybrané ploše



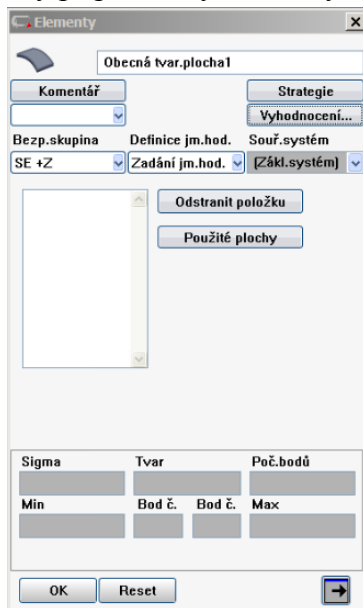
Obr. 81 Vytvoření elementu Obecná tvarová plocha

Pro vyhodnocení elementu *Obecná tvarová plocha* (Obr. 81) jsem musela vytvořit přizpůsobený souřadný systém, abych měla korigované výsledky. To znamená výsledky, kde se neprojeví nepřesnosti měřeného tvaru.

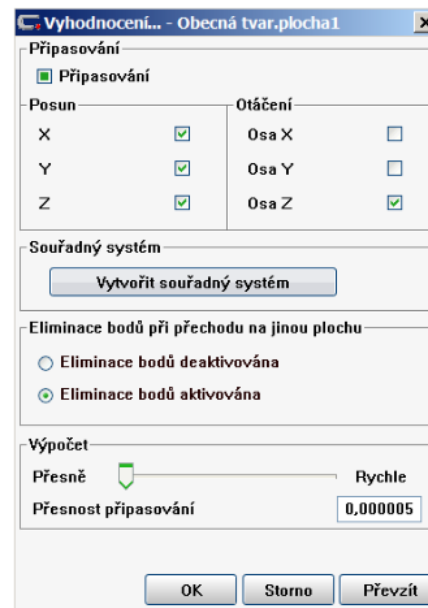


2016

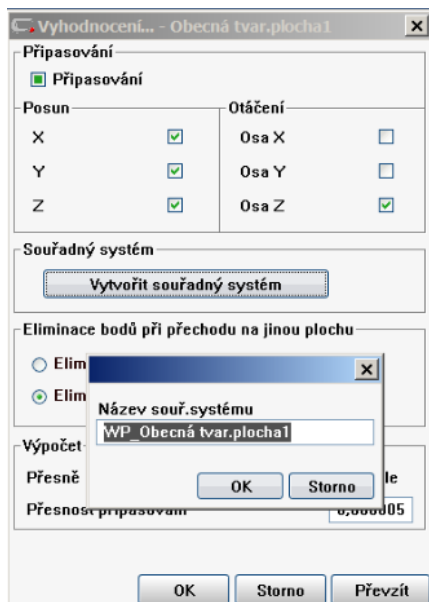
Otevřela jsem element Obecná tvarová plocha (obr. 81) a klikla na položku *Vyhodnocení* (obr. 82). V tabulce zobrazené na obr. 83 jsem nastavila připisování. Zatrhla jsem posun ve všech třech osách X, Y a Z a otáčení kolem osy Z. Tuto volbu jsem potvrdila kliknutím na tlačítko Vytvořit souřadný systém. Zobrazila se mi tabulka zobrazená na obr. 84, kterou jsem potvrdila a v záložce Charakteristiky se mi vytvořil nový připisovaný souřadný systém (obr. 85).



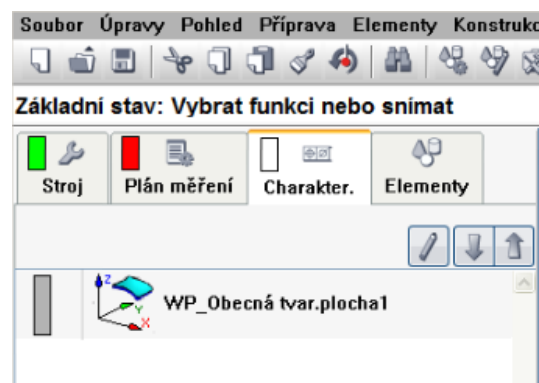
Obr. 82 Otevřený element Obecná tvarová plocha



Obr. 83 Záložka Vyhodnocení



Obr. 84 Vytvořit souřadný systém

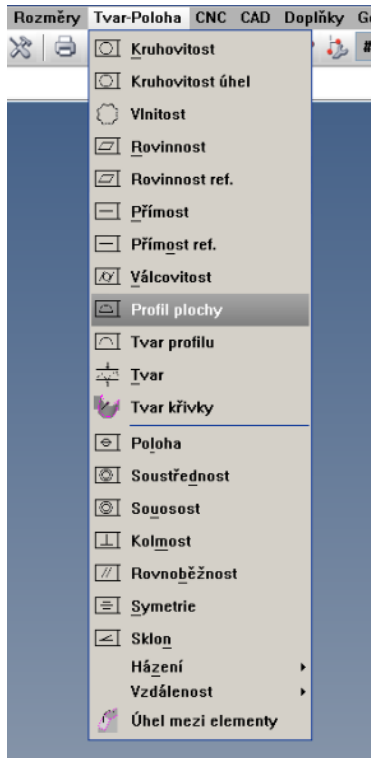


Obr. 85 Vytvoření připisovaného souřadného systému

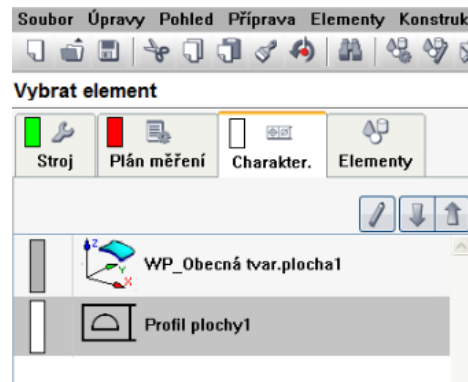


Druhým krokem bylo vytvoření měřené charakteristiky. V záložce *Tvar-poloha* jsem vybrala charakteristiku *Profil plochy* (obr. 86) a v záložce Charakteristiky se mi vytvořila nová charakteristika Profil plochy (obr. 87). Nově vytvořenou charakteristiku jsem otevřela. Jako element jsem zvolila obecnou tvarovou plochu a jako referenční

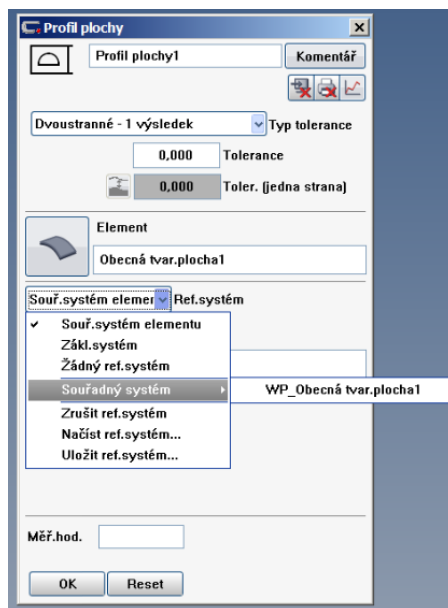
system jsem zvolila nově vytvořený připasovaný souřadný systém obecné tvarové plochy (obr. 88). Vlastní měření bude probíhat v základním souřadném systému, ale vyhodnocení bude probíhat k připasovanému souřadnému systému, abychom měli přesnější výsledky měření. Nakonec zvolila toleranci 0,06 mm a vše jsem potvrdila (obr. 89).



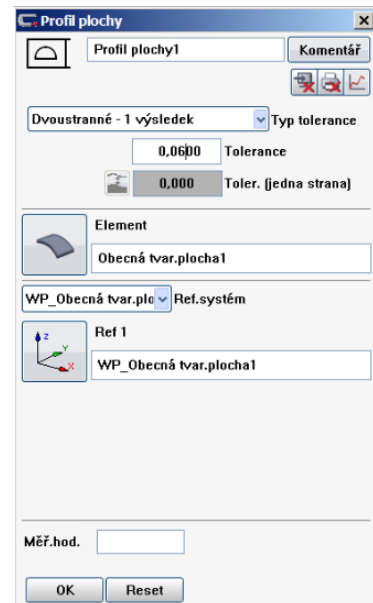
Obr. 86 Výběr charakteristiky



Obr. 87 Vytvoření charakteristiky Profil plochy



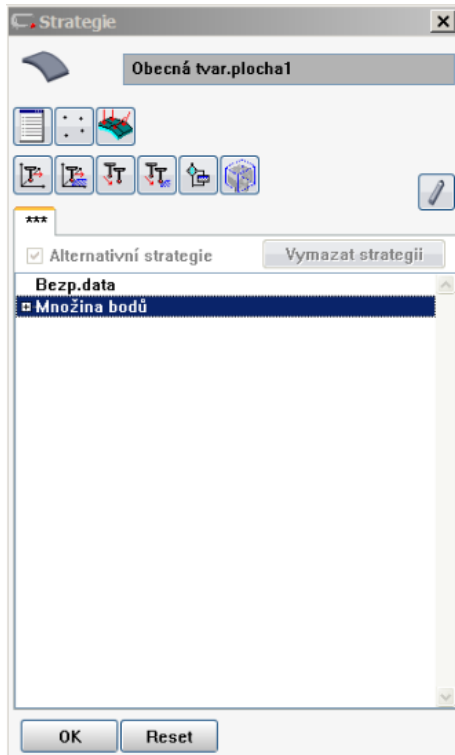
Obr. 88 Profil plochy – výběr souřadného systému



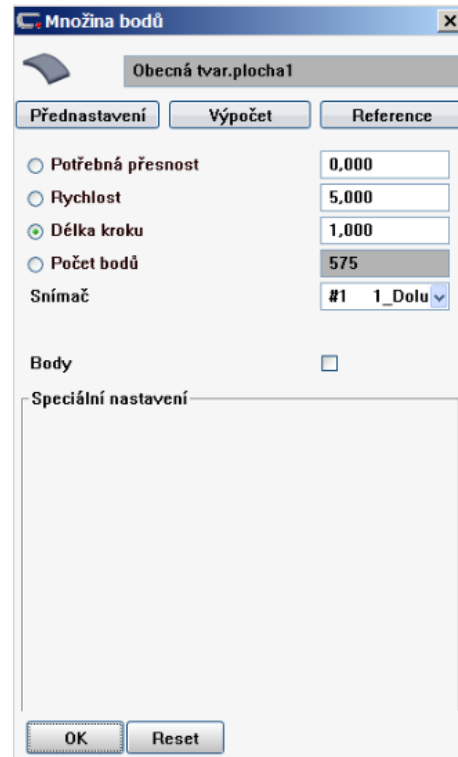
Obr. 89 Profil plochy



Třetím úkolem byla vlastní extrakce bodů. Mým úkolem bylo odzkoušet navržený plán měření obecné tvarové plochy při zvolené rychlosti. Pro nastavení rychlosti jsem opět otevřela element Obecná tvarová plocha (obr. 82) a klikla na položku *Strategie*. V této záložce (obr. 90) jsem zvolila položku *Množina bodů*, kde jsem si nastavila požadovanou rychlost a počet snímaných bodů (obr. 91).



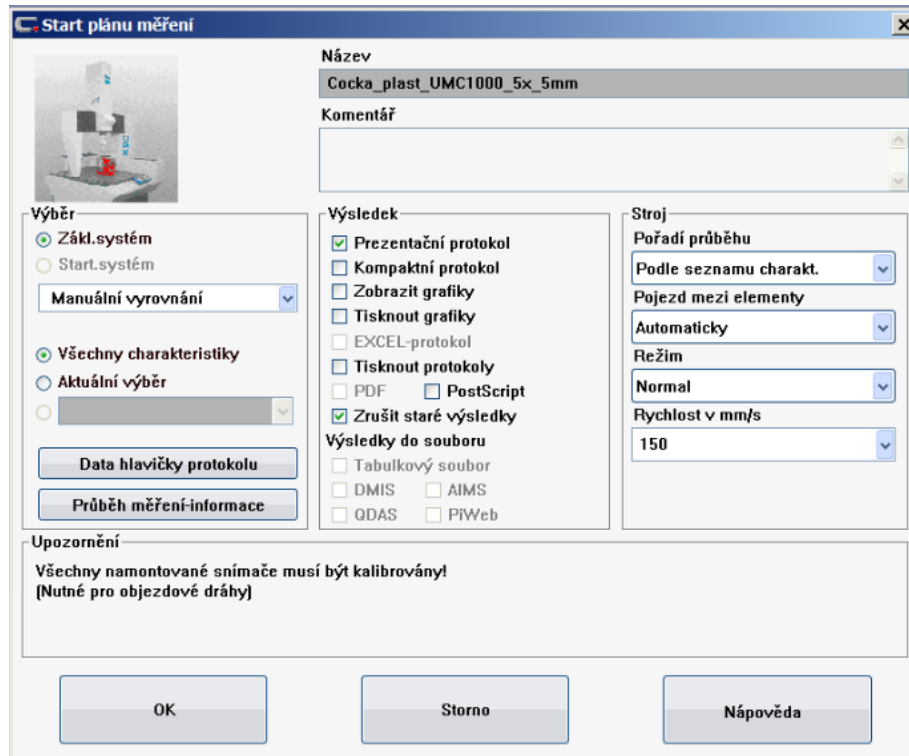
Obr. 90 Záložka Strategie



Obr. 91 Záložka Množina bodů - nastavení rychlosti

Po těchto krocích jsem přistoupila k vlastnímu měření. Nejprve jsem udělala teplotní kompenzaci vložení koeficientu teplotní roztažnosti polymethylmethakrylátu, která je $80 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Po tomto kroku jsem klikla na tlačítko *CNC start*. Zobrazila se mi tabulka, ve které jsem zvolila možnosti, jak je zobrazeno na obr. 92.






Měření začalo manuálním vyrovnáním. To spočívalo v ručním přibližném nasnímání bodů, které jsem se snažila rovnoměrně rozmístit po ploše CAD modelu. Po manuálním vyrovnání následně začalo vyrovnání souřadnicovým měřicím strojem. Proběhla dvě měření. Souřadnicový měřicí stroj pokaždé nasnímal body v souřadnicích, které jsem si nadefinovala na ploše CAD modelu. Po vyrovnání začalo vlastní měření při rychlosti, kterou jsem zvolila (obr. 91).



Obr. 92 Start plánu měření

4.6 Vyhodnocení

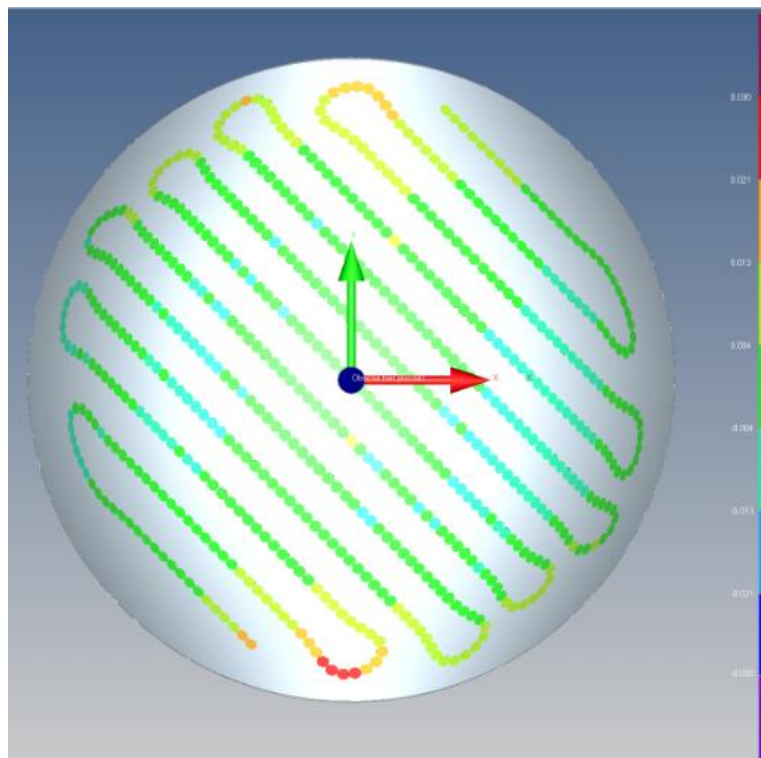
Jak jsem uvedla výše, měřila jsem charakteristiku profil plochy. Vyhodnocení měření jsem zvolila k přizpůsobenému souřadnému systému, abych měla přesnější výsledky. Dále bude ukázána možná prezentace naměřených výsledků.

| ZEISS Calypso | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|---------------------------|----------|-------|
| Plán měření Cocka_plast_UMC1000_5x_5mm | Datum 17 Juni 2016 | Zakázka Rychlost 5 mm_s | | | |
| Číslo výkresu * drawingno * | Operátor Master | Stroj C16Bit | Č.dílu inkrementálně 1 | | |
| Měř.hod. | Jm.hod. | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | |
|  Profil plochy1 | 0.051 | 0.000 | 0.060 | --- | 0.051 |
|  Profil plochy2 | 0.052 | 0.000 | 0.060 | --- | 0.052 |
|  Profil plochy3 | 0.052 | 0.000 | 0.060 | --- | 0.052 |
|  Profil plochy4 | 0.052 | 0.000 | 0.060 | --- | 0.052 |
|  Profil plochy5 | 0.053 | 0.000 | 0.060 | --- | 0.053 |

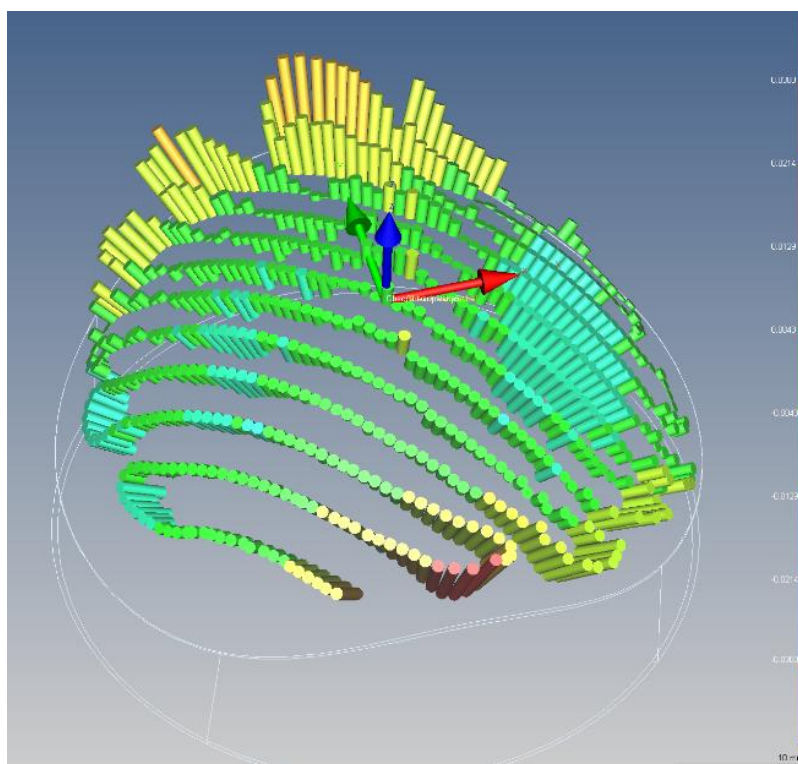
Obr. 93 Prezentační protokol



2016



Obr. 94 2D grafické znázornění



Obr. 95 3D grafické znázornění



Závěr

Cílem této práce bylo zaměřit se na problematiku měření obecných tvarových ploch s využitím CMM.

V úvodní části jsem se zabývala souřadnicovou měřicí technikou. Cílem mé práce bylo sestavit ucelený přehled o možnostech souřadnicové měřicí techniky a fungování souřadnicového měřicího stroje. Tedy o tom jaké existují konstrukce souřadnicových měřicích strojů, jaké typy snímacích systémů se na trhu vyskytují a možnosti používaných odměřovacích systémů.

V další části jsem popisovala princip souřadnicového měření a postup kontroly na CMM. Sepsala jsem ucelený přehled o postupu kontroly součásti na CMM pomocí dotykového snímacího systému.

V třetí části jsem se zabývala specifiky plánu měření při kontrole křivek a obecných tvarových ploch. Psala jsem o možnostech měření křivek v programu Calypso.

V závěru části jsem navrhla a sestavila plán měření obecné tvarové plochy na vzorku čočky po frézování. Plán jsem odzkoušela při zvolené rychlosti, která byla 5 mm/s. Uvedla jsem prezentační protokol a dvě možná grafická zobrazení.

Při postupném zvyšování rychlosti měření jsem zjistila, že odchylka měření se pohybuje kolem stejné hodnoty. Proto jsem praktickou část převážně zaměřila na odzkoušení navrženého plánu měření, čímž jsem prokázala jeho bezproblémovou funkčnost. Téma vlivu rychlosti na odchylku měření by mohlo být náplní diplomové práce.



Seznam použitých zdrojů

- [1] *Measurement Good Practice Guide: CMM probing*. 2014, (43). ISSN 1368-6550.
- [2] BERÁNEK, Libor. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE. *Strojírenská metrologie*. Praha, 2015.
- [3] EDITED BY ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. *Coordinate measuring machines and systems*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.
- [4] *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.hexagonmetrology.cz>
- [5] *TechPark* [online]. 2008 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk>
- [6] *Renishaw* [online]. c2001-2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/1030.aspx>
- [7] *ZEISS* [online]. 2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/corporate/cs_cz/home.html
- [8] *Coord3* [online]. c2012-2014 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://coordinate-measuring-machine.net>
- [9] *Kuličkové šrouby pro posuvové soustavy s dlouhým zdvidem* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/40287/DP-Milan%20Novacek%2024.5.2015.pdf?sequence=2>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ MAREK, Dr.
- [10] Odměřovací systémy a jejich vliv na přesnost. MM spektrum [online]. 2013, 50 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost.html>
- [11] Souřadnicové měřicí stroje. *Katedra výrobních systémů a automatizace* [online]. [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [12] *HEIDENHAIN* [online]. c2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.heidenhain.cz>



2016

- [13] Rotační snímače (enkodéry). *MM spektrum* [online]. 2005, 28 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rotacni-snimace-enkodery.html>
- [14] *Globalspec* [online]. c2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com>
- [15] *Global Encoder Solutions Group* [online]. 2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: http://www.globalencoder.com/xist4c/web/GESgroup---Encoders_id_4901_.htm
- [16] Použití lineárních induktivních měřitek na strojích. *MM spektrum* [online]. 2003, , 32 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-linearnich-induktivnich-meritek-na-strojich.html>
- [17] Magnetické snímače polohy. *MM spektrum* [online]. 2004, , 82 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/magneticke-snimace-polohy.html>
- [18] Magnetické a optické snímače polohy. *MM spektrum* [online]. 2007, , 48 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/magneticke-a-opticke-snimace-polohy.html>
- [19] *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30059. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MIROSLAV OPL.
- [20] *WITTE* [online]. c2016 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://www.horst-witte.com/index.php>
- [21] *Measurement Good Practice Guide: CMM measurement strategies* [online]. 2014 [cit. 2016-07-05]. ISSN 1368-6550.
- [22] CALYPSO – základní program, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [23] *Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63650/F2-DP-2015-Muller-Marek-Vliv%20produktivity%20kontroly%20na%20CMM%20na%20zpusobilost%20p>



- rocesu%20mereni.pdf?sequence=-1. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [24] SAVIO, E., L. DE CHIFFRE a R. SCHMITT. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2007, **56**(2), 810-835 [cit. 2016-07-05]. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607001588>
- [25] *A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces* [online]. 2007 [cit. 2016-07-05]. ISSN 1744-0254. Dostupné z: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/depc_em14.pdf
- [26] CALYPSO – Opce 1 – Software pro CNC měření křivek, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [24] *Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63650/F2-DP-2015-Muller-Marek-Vliv%20produktivity%20kontroly%20na%20CMM%20na%20zpusobilost%20procesu%20mereni.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [25] SAVIO, E., L. DE CHIFFRE a R. SCHMITT. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2007, **56**(2), 810-835 [cit. 2016-07-05]. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607001588>
- [26] *A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces* [online]. 2007 [cit. 2016-07-05]. ISSN 1744-0254. Dostupné z: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/depc_em14.pdf
- [27] CALYPSO – Opce 1 – Software pro CNC měření křivek, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011



2016

Seznam použitých symbolů a zkratk

| | |
|-------|---|
| CAD | Computer Aided Desing – počítačová podpora konstruování |
| CMM | Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj |
| CNC | Computer Numerical Control – číslicově řízený pomocí počítače |
| DCC | Direct Computer Controlled – přímo řízené počítačem |
| GPS | Geometrical Product Specifications – geometrické tolerance |
| NURBS | NeUniformní Racionální B-Spline |
| 1D | One Dimensional - lineární |
| 2D | Two Dimensional – dvojrozměrný |
| 3D | Three Dimensional - trojrozměrný |

**Seznam obrázků**

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Typické uspořádání CMM [2]..... | 7 |
| Obr. 2 | Rozdělení souřadnicových měřicích strojů [2]..... | 8 |
| Obr. 3 | DuraMax [7] | 9 |
| Obr. 4 | MMZ B [7] | 9 |
| Obr. 5 | ACCURA 2000 [7]..... | 10 |
| Obr. 6 | Leitz PMM-C [4]..... | 10 |
| Obr. 7 | ZEISS PRO [7] | 11 |
| Obr. 8 | Typická konstrukce měřicího ramena [3]..... | 12 |
| Obr. 9 | ROMER Absolute ARM [6]..... | 12 |
| Obr. 10 | Leica Absolute Tracker AT402 [8] | 12 |
| Obr. 11 | ScanMax [7] | 13 |
| Obr. 12 | zCAT | 13 |
| Obr. 13 | Rozdělení snímacích systémů CMM [2] | 14 |
| Obr. 14 | Měření dotykovým snímacím systémem [10] | 15 |
| Obr. 15 | Dotykový snímací systém..... | 15 |
| Obr. 16 | Přímý dotek | 16 |
| Obr. 17 | Hvězdicový dotek..... | 16 |
| Obr. 18 | Diskový dotek..... | 16 |
| Obr. 19 | Válcový dotek..... | 17 |
| Obr. 20 | Špička a dutá polokoule..... | 17 |
| Obr. 21 | VAST XXT | 18 |
| Obr. 22 | Otočná hlava RDS | 18 |
| Obr. 23 | VAST XTR gold..... | 19 |
| Obr. 24 | VAST gold..... | 19 |
| Obr. 25 | Měření bezdotykovým..... | 19 |
| Obr. 26 | PRECITEC Lateral Resolution [16]..... | 20 |
| Obr. 27 | HP-C-VE Vision Sensor | 20 |
| Obr. 28 | LineScan | 21 |
| Obr. 29 | ViScan | 21 |
| Obr. 30 | Princip vzduchového uložení [17]..... | 21 |
| Obr. 31 | Ozubený hřeben [3] | 22 |
| Obr. 32 | Řemenový převod [3] | 23 |
| Obr. 33 | Třecí převod [3]..... | 23 |
| Obr. 34 | Provedení kuličkových šroubů [9]..... | 24 |
| Obr. 35 | Kuličkový šroub [3]..... | 24 |
| Obr. 36 | Lineární pohon..... | 25 |
| Obr. 37 | Fotoelektrický princip měření se skleněným měřítkem [3]..... | 27 |
| Obr. 38 | Fotoelektrický princip měření s ocelovým měřítkem [3] | 28 |
| Obr. 39 | Princip měření pomocí interference [22]..... | 28 |
| Obr. 40 | Princip rotačního optického enkodéru [24] | 29 |
| Obr. 41 | Rotační enkodéry [26] | 29 |
| Obr. 42 | Lineární induktosyn..... | 30 |
| Obr. 43 | Lineární snímač LM15 | 31 |
| Obr. 44 | Magnetický stupnicový | 31 |
| Obr. 45 | Princip Michelsonova interferometru | 31 |
| Obr. 46 | Laserový interferometr | 31 |
| Obr. 47 | Princip měření pomocí CMM [35] | 33 |



| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 48 | GPS..... | 33 |
| Obr. 49 | Upínací sada firmy Renishaw..... | 35 |
| Obr. 50 | Upínací přípravky Alufix | 35 |
| Obr. 51 | Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem [38]..... | 35 |
| Obr. 52 | Geometrické elementy sestavené z minima bodů | 40 |
| Obr. 53 | Příklad NURBS reprezentace [24] | 42 |
| Obr. 54 | Rovinná křivka | 43 |
| Obr. 55 | Prostorová křivka..... | 43 |
| Obr. 56 | Axiální křivka zdvihu s | 43 |
| Obr. 57 | Definování tolerance křivky | 46 |
| Obr. 58 | Okno Strategie na příkladu elementu kružnice [54]..... | 47 |
| Obr. 59 | Výpis bodů křivky | 47 |
| Obr. 60 | Okno pro zadání skenování křivek | 49 |
| Obr. 61 | Obecné charakteristiky [26] | 49 |
| Obr. 62 | Speciální charakteristiky [26]..... | 50 |
| Obr. 63 | Úvodní obrazovka | 52 |
| Obr. 64 | Postup načtení CAD modelu | 52 |
| Obr. 65 | Načtený CAD model | 52 |
| Obr. 66 | Postup transformace CAD modelu | 53 |
| Obr. 67 | Tabulka transformace CAD modelu..... | 53 |
| Obr. 68 | Transformace os modelu | 53 |
| Obr. 69 | Bezpečnostní kvádr | 53 |
| Obr. 70 | Referenční snímač | 54 |
| Obr. 71 | Kalibrační koule | 54 |
| Obr. 72 | Snímač | 54 |
| Obr. 73 | Kalibrace snímače | 54 |
| Obr. 74 | Upnutí měřené součásti | 55 |
| Obr. 75 | Definování prostorových bodů..... | 56 |
| Obr. 76 | Základní souřadný systém - 3D připasování | 56 |
| Obr. 77 | Postup vytvoření měřeného elementu | 56 |
| Obr. 78 | Záložka množina bodů | 57 |
| Obr. 79 | Měřená plocha | 57 |
| Obr. 80 | Vytvoření bodů na vybrané ploše..... | 57 |
| Obr. 81 | Vytvoření elementu Obecná tvarová plocha | 57 |
| Obr. 82 | Otevřený element Obecná tvarová plocha..... | 59 |
| Obr. 83 | Záložka Vyhodnocení..... | 58 |
| Obr. 84 | Vytvořit souřadný systém..... | 58 |
| Obr. 85 | Vytvoření připasovaného souřadného | 58 |
| Obr. 86 | Výběr charakteristiky | 59 |
| Obr. 87 | Vytvoření charakteristiky Profil plochy | 59 |
| Obr. 88 | Profil plochy – výběr souřadného systému | 59 |
| Obr. 89 | Profil plochy | 59 |
| Obr. 90 | Záložka Strategie | 60 |
| Obr. 91 | Záložka Množina bodů - nastavení rychlosti..... | 60 |
| Obr. 92 | Start plánu měření..... | 61 |
| Obr. 93 | Prezentační protokol | 61 |
| Obr. 94 | 2D grafické znázornění..... | 62 |
| Obr. 95 | 3D grafické znázornění..... | 62 |



Seznam tabulek

| | | |
|--------|--|----|
| Tab. 1 | Seznam kalibračních metod [39]..... | 36 |
| Tab. 2 | Minimum potřebných bodů pro nasnímání geometrických elementů [45]..... | 39 |
| Tab. 3 | Možné elementy pro řez s křivkou [26] | 45 |