

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly
kvality**

Bakalářská práce

Autor: Martin Purkart

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Purkart** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **459898**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly kvality

Název bakalářské práce anglicky:

Coordinate measuring machines and its application in the field of quality control

Pokyny pro vypracování:

1. Dostupná řešení v oblasti souřadnicové měřicí techniky a jejich typické aplikace
2. Principy snímání využívané v dotykových skenovacích systémech
3. Návrh plánu měření pro zadanou strojní součást

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Libora Beránka, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Praze dne:

.....

Martin Purkart

Poděkování

Děkuji Ing. Liboru Beránkovi, Ph. D. za cenné rady a vedení při vypracování této bakalářské práce. Také děkuji Ing. Vladimíru Šulcovi za pomoc při měření zadaných součástí.

Velký dík patří i mojí rodině za podporu během celého mého studia, a to jak psychickou, tak finanční.

Abstrakt

Práce se týká využití kartézských souřadnicových měřicích strojů v procesu kontroly kvality. První část obsahuje stručnou rešerši týkající se kvality. Práce uvádí rozdělení CMM a jejich konkrétní příklady. Dále je uvedeno rozdělení sensoriky, která se při měřeních na CMM využívá.

V další části je na dvou zadaných součástech použito kamerové a dotykové měření. U konkrétního rozměru jsou výsledky dotykového měření porovnávány s výsledky z optického měření. U optického měření bylo použito různých nastavení v softwaru Calypso.

Klíčová slova

Kvalita, souřadnicové měřicí stroje, CMM, senzory

Abstract

This thesis concerns the use of Cartesian coordinate measuring machines in the process of quality control. The first part contains short research about quality. The thesis contains distribution of the CMMs and their particular examples. It also contains distribution of sensors used for CMM measurements.

In the next part, two components are measured by camera and contact sensors. For specific extent, the results from contact and optical measurement are compared. The optical measurement used different settings in the Calypso software.

Key words

Quality, coordinate measuring machines, CMM, sensors

Obsah

1 Úvod	6
2 Kvalita	7
3 Souřadnicové měřicí stroje	8
3.1 Rozdělení CMM podle normy ISO 10360 – 1.....	11
3.1.1 Stojanový typ	11
3.1.2 Výložníkový typ	12
3.1.3 Portálový typ	14
3.1.4 Mostový typ	15
4 Senzorika	17
4.1 Kontaktní snímací systémy	17
4.1.1 Bodové snímací systémy	19
4.1.2 Skenovací (měřicí) snímací systémy	19
4.1.3 Porovnání portfolia dotykových snímačů	20
4.2 Bezkontaktní snímací systémy	26
4.2.1 Kamerové senzory	26
4.2.2 Triangulační senzory	27
4.2.3 Senzory pro měření vzdálenosti	30
5 Měření zadaných součástí	31
5.1 Měření s využitím dotykového snímacího systému	32
5.2 Měření s využitím kamerového snímacího systému	37
6 Závěr	40
7 Seznam použité literatury	41
8 Seznam obrázků	44
9 Seznam tabulek	45

1. Úvod

Souřadnicové měřicí stroje jsou dnes využívány při kontrole kvality výrobků již zcela běžně. Každá součást (například v automobilové výrobě, kde jsou CMM hojně využívány) podléhá přísné kontrole. Kromě přesnosti, kterou jsme se současnými stroji schopni měřit i na tisíce mikrometru, je důležitá také rychlost měření, od čehož se odvíjí výběr jak konkrétního stroje, tak senzoriky pro jednotlivé součásti.

Souřadnicové měřicí stroje tedy při současných nárocích na vysokou přesnost i vysokou rychlost představují ideální řešení pro většinu výrobních linek. Jejich rozmanitost rozměru, přesnosti i rychlosti umožňuje většině podniků zvolit pro svou výrobu ideální variantu.

Ve své práci budu rozebírat typy souřadnicových měřicích strojů podle jejich konstrukce. Dále se budu věnovat problematice snímacích systémů, jejich rozdělení a využití v praxi. V závěru práce poté navrhnu měření pro dvě zadané součásti obrobků šachových figurek a budu porovnávat vhodnost kontaktního a optického měření na těchto konkrétních obrobkách.

2. Kvalita

Kvalitu definujeme jako stupeň splnění požadavků zákazníka souborem požadovaných znaků. Tyto znaky v odvětví strojírenství souvisí hlavně s podstatou produktu. Kvalita obsahuje vše od materiálu, typu polotovaru až po finální výrobek. Odvíjí se vždy jak od požadavků zákazníka, tak od účelu produktu. Abychom byli schopni vyžadovanou kvalitu dodržovat, využijeme principů tzv. systému managementu kvality.

Systém managementu kvality vznikl kvůli požadavku na zavedení systému, který by byl schopen udržet konstantní kvalitu bez testování každého výrobku zvlášť. Je postaven na čtyřech základních principech. Jsou jimi plánování, kontrola, trvalé zlepšování a také prokazování kvality. Ve strojírenství se při kontrole kvality zaměřujeme zejména na následující parametry:

- Rozměrová tolerance
- Geometrická tolerance
- Kvalita povrchu
- Chemické a mechanické vlastnosti

K udržení těchto parametrů nám může jako nástroj posloužit norma *ČSN EN ISO 9001 - Systémy managementu kvality – Požadavky*. Ta je souborem požadavků, které podniky musí plnit, aby prokázaly schopnost dodržovat požadovanou úroveň svých produktů. [24]

3. Souřadnicové měřicí stroje

Pokud se bavíme o kontrole kvality, konkrétně tedy o oblasti měření ve strojírenství, představují souřadnicové měřicí stroje (coordinate measuring machines, zkráceně CMM) jednu z nejvýznamnějších inovací.

Tyto stroje mají původ v ručně ovládaných zařízeních pro jednoduché měření. Vzhledem k nutnosti přesného měření složitých komponentů ve vesmírném programu USA v 50. letech minulého století se začaly používat číslicově řízené (NC) stroje a následně bylo v 70. letech zavedeno používání číslicových strojů řízených počítačem (CNC), které pomohly k přesnějšímu měření než jakákoliv předchozí zařízení. Jejich dalším, neméně důležitým využitím se stalo také měření v automobilovém a leteckém průmyslu, konkrétně se tedy bavíme např. o měření karoserií aut nebo lopatek v motorech letadel.

Tyto stroje jsou v dnešní době ovládány počítačem, které jsou opatřeny příslušným softwarem. Využíváme je k měření rozměrových a geometrických tolerancí součástí.

[1] [2] [3]

Tabulka 1 Rozdělení geometrických tolerancí [3]

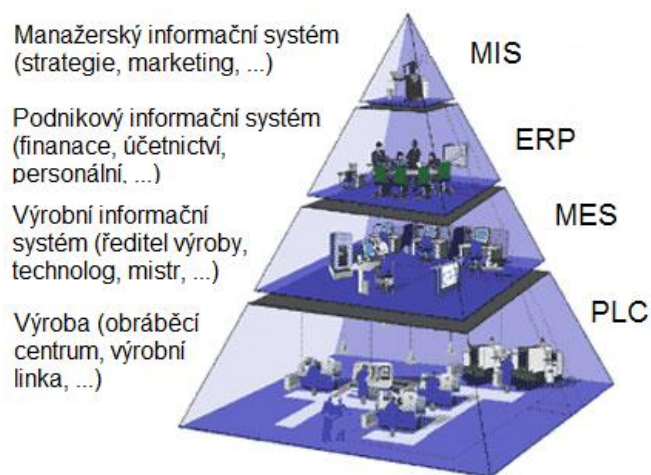
Tolerance	Charakteristika	Značka	Potřeba základny
tvaru	přímost	—	ne
	rovinnost		ne
	kruhovitost		ne
	válcovitost		ne
	(obrysová) čára profilu		ne
	povrch (plocha) profilu		ne

Tolerance	Charakteristika	Symbol	Potřeba základny
směru	rovnoběžnost	//	ano
	kolmost	⊥	ano
	sklon	∠	ano
	(obrysová) čára profilu	⌒	ano
	povrch (plocha) profilu	⌒	ano
Tolerance	Charakteristika	Symbol	Potřeba základny
umístění	poloha	⊕	ano nebo ne
	soustřednost	⊙	ano
	souosost	⊙	ano
	souměrnost	≡	ano
	(obrysová) čára profilu	⌒	ano
	povrch (plocha) profilu	⌒	ano
Tolerance	Charakteristika	Symbol	Potřeba základny
	kruhové házení	↗	ano
	celkové házení	↗↖	ano

Princip souřadnicového měření spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru. Polohu naměřených bodů poté vyjadřujeme jako vzdálenosti v osách X, Y, Z. Velká výhoda CMM strojů, kterou konvenční stroje nenabízí, spočívá hlavně v možnosti určení základního bodu kdekoliv v rozmezí pracovního prostoru. Číslkové vyhodnocení je oproti zdoluhavému a namáhavému měření ze stupnic používaných při tradičním způsobu měření značnou úlevou

pro operátora, stejně tak jako automatická registrace bodů do počítačového systému. CMM nám slouží jako zdroje dat, které je však potřeba kvůli jejich často velkému množství pečlivě třídit. K tomu nám poslouží tzv. výrobní informační systémy. [1] [2] [3]

Manufacturing Execution Systems (MES), neboli výrobní informační systémy tvoří vazbu mezi podnikovými informačními systémy a systémy pro automatizaci výroby. Během celé historie vývoje těchto systémů bylo definováno několik hlavních aktivit, které tyto systémy zabezpečují. Několik vybraných je popsáno níže.



Obrázek č. 1 Informační systémy [4]

Systém MES zprostředkovává například následující činnosti:

- Správa výrobních zdrojů
- Správa výrobních postupů
- Detailní plánování výroby
- Dispečerské řízení
- Řízení výroby
- Sběr dat
- Sledování výrobků a jejich rodokmen
- Výkonnostní analýzy

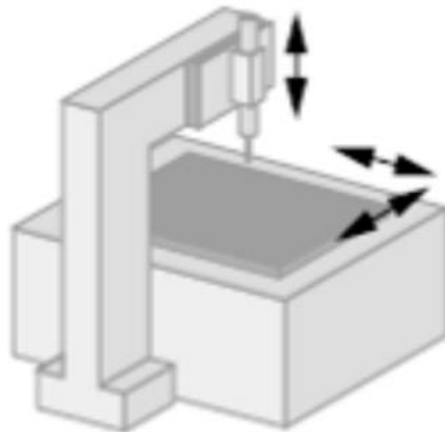
[4]

3.1 Rozdělení CMM podle normy ISO 10360 – 1

3.1.1 Stojanový typ

Souřadnicový měřicí stroj stojanového typu je díky své konstrukci ideální například pro měření různých dílů automobilu, a to i během montáže. Základ je nosný sloup, na kterém je upevněné posuvné horizontální rameno. Na konci tohoto ramena se nachází snímací hlava. Pokud bychom v praxi využívali tyto stroje na měření velkých součástí z obou stran, zapojíme do měření dva synchronně pracující stroje této konstrukce. Jejich velkou výhodou je snadná integrace do výrobních linek. Disponují velkým pracovním prostorem a také otevřenou konstrukcí, což je u již uvedeného měření automobilových dílů nezbytné.

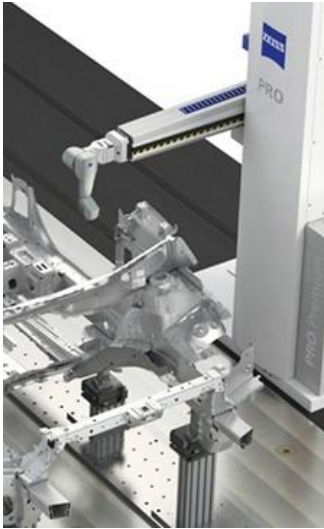
[5] [6]



Obrázek č. 2 Stojanový typ CMM [6]

Konkrétní příklady:

Firma ZEISS: PRO



Obrázek č. 3 PRO [7]

Firma Hexagon: DEA BRAVO Console



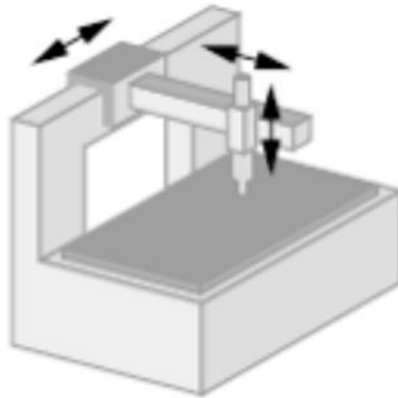
Obrázek č. 4 DEA BRAVO Console [8]

Rameno těchto strojů, které je umístěné na boku pracovní desky, je schopno se pohybovat i zcela mimo pracovní prostor. Toto řešení poskytuje optimální přístup do pracovního prostoru pro jednoduché úkony založení a vyložení měřené součásti. Konzolová řada DEA BRAVO je vhodná například pro středně velké díly v průmyslovém prostředí. Tento stroj disponuje tuhou pinolou o průřezu 80x100 mm. ZEISS PRO je k dispozici ve třech modelech. V prvním umožňuje provedení v úrovni podlahy bezpečný přístup ze všech stran. Ve druhém modelu se může varianta na podlaze umístit na stávající základ. V posledním případě není model se stolem (PRO T) závislý na základu. Stůl sám o sobě poskytuje stabilní základnu, která je zároveň dostatečně pevná. Každá z těchto variant může být vybavena jedním ramenem nebo dvojitým ramenem. [7] [8]

3.1.2 Výložníkový typ

Skládá se z pohyblivého konzolového ramene, na kterém je umístěná pojízdná pinola. V tomto případě obstarává pinola posun po ose „y“ a je nutno při měření využít vyvažování. Jeho hlavní výhodou spočívá v tom, že při polohování snímacího systému je v pohybu jen minimum hmotnosti, díky čemuž můžeme při měření součásti dosahovat vysokých

rychlostí. Manipulační prostor je přístupný ze tří stran. Je pro něj ale také charakteristický vznik ohybových momentů, způsobený pohybem osy „z“ po výložníku který se pohybuje k vnější krajní poloze a také je z důvodu tuhosti osa „y“ poměrně krátká. Jeho měřicí plocha se pohybuje většinou okolo rozměrů 500x500x500mm. U těchto strojů jsou používána valivá ložiska, která mají oproti vzduchovým ložiskům tu výhodu, že jsou při výkonu práce méně zatěžována nečistotami. [5]



Obrázek č. 5 Výložníkový typ CMM [6]

Konkrétní příklady:

Firma ZEISS: DuraMax



Obrázek č. 6 Dura Max [9]

Firma Hexagon: TIGO SF

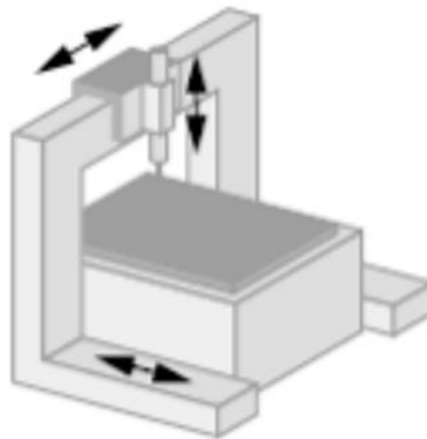


Obrázek č. 7 TIGO SF [10]

Oba tyto stroje jsou vhodné do dílenského prostředí a jsou schopny měřit zejména kontury a tvarové plochy. Využívají se pro měření malých anebo středně velkých součástí. Ani jeden ze strojů nevyžaduje žádný tlakový vzduch. Dura Max disponuje integrovaným systémem tlumícím vibrace a má zcela zakryté vodící dráhy a také poskytuje teplotní stabilitu od +18 do +30 °C. [9] [10]

3.1.3 Portálový typ

Co se týče kartézských souřadnicových strojů, je portálový typ co do konstrukce vůbec nejrozšířenější variantou. Stroj je dodáván ve dvou základních variantách, a to s pohyblivým portálem a naopak s pohyblivým stolem a pevným portálem. Předností této konstrukce je velmi dobrá dosahovaná přesnost, která dosahuje hodnot až $0,5 + L/500 \mu\text{m}$, hodí se tedy spíše pro laboratorní měření. Jako nevýhodu portálového typu je třeba uvést omezenou velikost měřených výrobků. [5]



Obrázek č. 8 Portálový typ CMM [6]

Konkrétní příklady:

Firma ZEISS: PRISMO Firma



Obrázek č. 9 Prismo [11]

Hexagon: Leitz Infinity



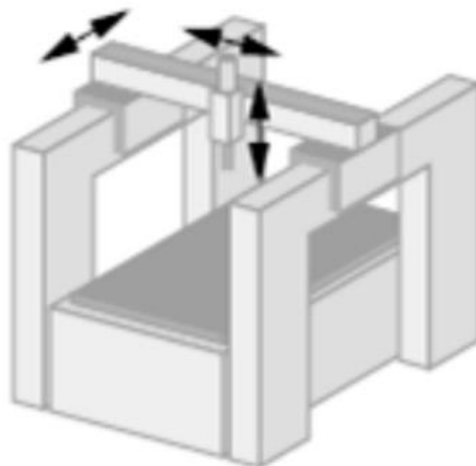
Obrázek č. 10 Leitz Infinity [37]

Tyto stroje mají maximální dovolenou chybu při měření délky okolo $0,5+L/500$ mikrometru. PRISMO nabízí velmi tuhý a lehký portál díky kombinaci keramiky a kompozitních materiálů, které jsou na bázi uhlíkových vláken. Měřítka jsou z teplotně neutrální sklokeramiky. Všechny osy jsou opatřeny vzduchovými ložisky a to v poměru: 8 vzduchových ložisek na ose X, 8 vzduchových ložisek na ose Y a 5 vzduchových ložisek na ose Z. Stroj je také opatřen elastomerovým tlumením vibrací a zakrytím vodících drah. Může měřit součásti do hmotnosti až 5000 kg. Charakteristickým rysem stroje Leitz Infinity je konstrukce s uzavřeným rámem. Díky této konstrukci dosahuje vysoké přesnosti měření. Stůl je pohyblivý, usazený na vzduchových lůžkách s centrálně umístěným vřetenovým pohonem a dokáže unést váhu do 750kg. [11] [37]

3.1.4 Mostový typ

Tento typ souřadnicového měřicího stroje je vhodný zejména k měření velkých součástí. Mostový typ disponuje masivní konstrukcí, která omezuje ohybové momenty vyvolané hmotností stroje. Díky tomu jsou redukována negativní ovlivnění měření. Stroj je také vybaven duálním pohonem, díky kterému je zabráněno natáčení mostu.

Mostový CMM má tu výhodu, že poskytuje poměrně velkou měřicí plochu a navíc i volný přístup operátorovi ke všem částem objemu stroje. Využívá se tedy proto především v závodech, které se zaměřují na kontrolu velkých dílů, konkrétně např. velkých odlitků, obroběných součástí, dílů leteckého nebo energetického průmyslu. [5]



Obrázek č. 11 Mostový typ CMM [6]

Konkrétní příklady:

Firma ZEISS: MMZ E



Obrázek č. 12 MMZ E [12]

Firma Hexagon: DEA ALPHA



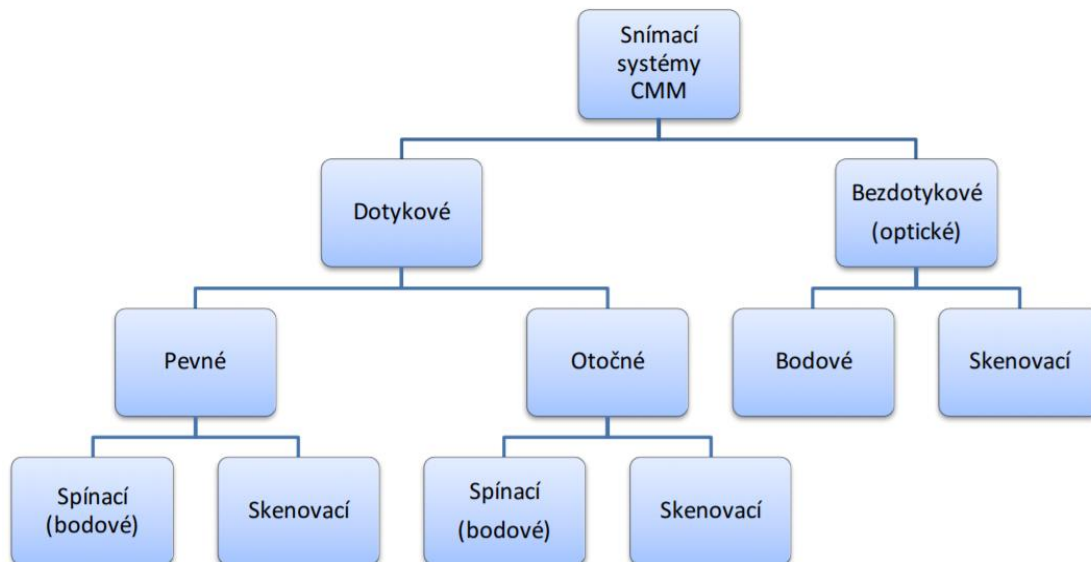
Obrázek č. 13 DEA ALPHA [13]

Tyto stroje jsou určeny zejména pro kontrolu obrobků přepravovaných podlahovými dopravníky. Nabízejí otevřený přístup ze všech čtyř stran. Je také možné zakládání jeřábem. Jsou ideální pro měření velkých dílů, využití nachází především ve strojírenství, v automobilovém nebo leteckém průmyslu, nebo i pro kontrolu satelitní techniky. Chyba měření délky je v případě MZZ E od $3,5 + L/230 \mu\text{m}$, v případě stroje DEA poté od $3,5 + 3,5 L/1000$. [12] [13]

4.Senzorika

Snímací systémy pro souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou nedílnou součástí celého měřicího systému a tvoří spojení mezi strojem a obrobkem. Správná volba, konfigurace, kvalifikace, a využití jsou nezbytné k tomu, aby se využil plný potenciál souřadnicového měřicího systému (CMS). Po uživatelích CMM se vyžaduje naprosté pochopení vlastností a rozdílů obrovské rozmanitosti snímacích systémů a jejich dalšího vývoje, aby tak mohly být pro dané měřicí aplikace vybrány a používány odpovídající systémy nákladově efektivním způsobem. [5]

Rozdělení:

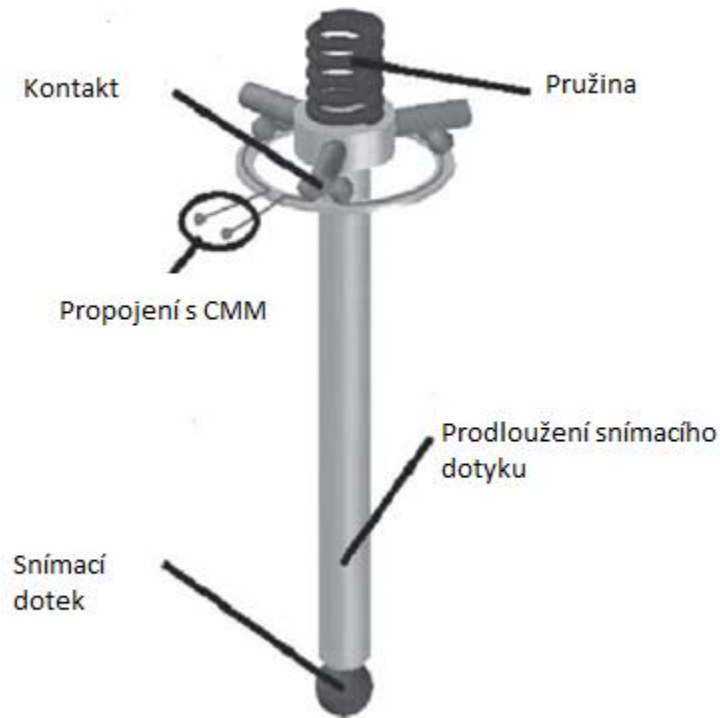


Obrázek č. 14 Rozdělení snímacích systémů [3]

4.1 Kontaktní snímací systémy

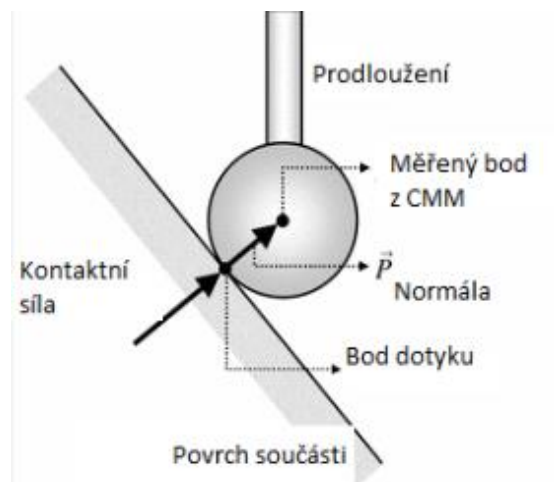
Kontaktní snímací systémy jsou založeny na fyzickém dotyku mezi snímací sondou a měřeným objektem. Snímacím prvkem pro vytvoření mechanické interakce s obrobkem je nejčastěji kulička. Špička kuličky musí vykazovat velmi vysokou tuhost a nízké opotřebení. Tyto kuličky jsou obvykle vyrobeny z rubínového materiálu. Díky tomu mají velmi hladký povrch a jsou odolné proti opotřebení.

Prodloužení snímacího doteku přenáší kontakt (sílu snímání) ke snímači. Musí vykazovat velmi vysokou a stejnoměrnou tuhost, nízkou tepelnou roztažnost a nízkou hmotnost. Jsou vyrobeny například z materiálů karbidu wolframu, keramiky nebo z plastu vyztuženého uhlíkovými vlákny. [5]



Obrázek č. 15 Dotykový snímací systém [5]

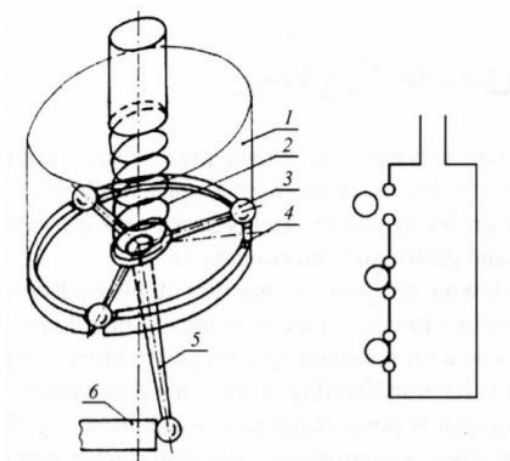
Na obrázku (16) je zakreslen moment snímání měřeného bodu včetně síly působící v daný okamžik na snímací kuličku.



Obrázek č. 16 Moment snímání měřeného bodu [38]

4.1.1 Bodové snímací systémy

Bodové snímací systémy nacházejí využití zejména při měření běžných geometrických prvků, u kterých není třeba vyhodnocovat odchylku tvaru. Jedná se o sekvenční měření bodů, které se nacházejí na povrchu součásti. Provádí se pozvednutím sondy mezi dvěma měřeními a dotknutím se znovu v dalším snímaném bodě. Při dotknutí snímacího dotyku s povrchem obrobku je vyvolán spínací signál. Výsledkem měření jsou u těchto systémů samostatné body. Jejich předností jsou nižší cena, hmotnost a velikost. Nevýhoda spočívá v jejich nízké měřicí rychlosti, protože je třeba se ke každému snímacímu bodu přiblížit a po sejmutí se od něj opět vzdálit. [14]



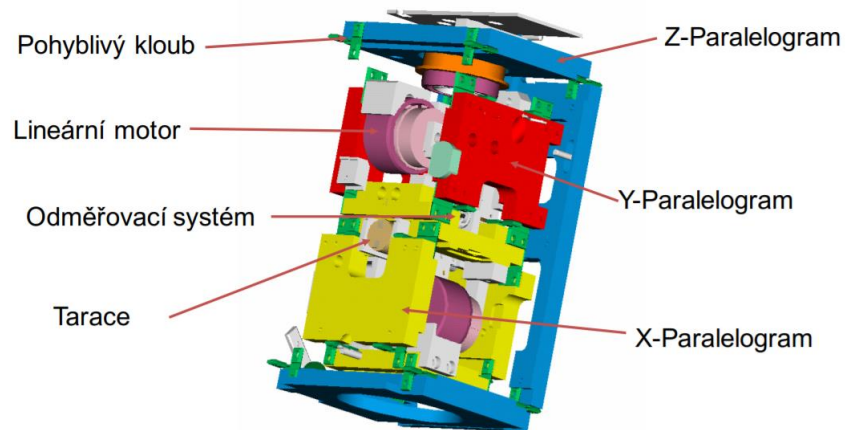
Obrázek č. 17 Kinematické schéma kontaktní sondy – rozpojení kontaktu [6]

Na obrázku je elektromagnetická sonda se třemi kontakty po 120° . Modul je magneticky uchycen, což zaručuje možnost automatické výměny a i částečnou ochranu proti kolizi.

4.1.2 Skenovací (měřicí) snímací systémy

Tato metoda snímání nám umožňuje skenování po nastaveném kroku, i když dnes snímací hlavy často poskytují také klasické snímání pomocí bodů. Měřicí snímací systémy byly vyvinuty kvůli požadavkům na rychlejší snímání bodů a lepší opakovatelnost měření, což vede i k vyšší přesnosti. Díky své rychlosti, všestrannosti a v dnešní době už i vysoké přesnosti měření se jedná o nejpoužívanější snímací systém. [5]

Konstrukce aktivní pevné skenovací hlavy



Obrázek č. 18 Konstrukce aktivní pevné skenovací hlavy [3]

4.1.3 Porovnání portfolia dotkových snímačů

Firma Zeiss

VAST XXT



Obrázek č. 19 VAST XXT [15]

Díky flexibilitě otočné hlavy řadíme tento produkt jako otočný snímací systém. Nabízí i funkci skenování, čímž doplňuje informace o tvaru měřených prvků. Na tento snímač je možno umístit i další boční snímače, a to do délky 65 milimetrů. [15]

VAST gold

Tento měřicí senzor je ideální pro měření po bodech. Umožňuje snímání se snímači o délce až 800 mm a vahou až 600 g. Je také možno použít asymetrické konfigurace snímačů. Vyznačuje se vysokou rychlostí a díky své integrované ochraně proti kolizi je i velmi robustní. Použití v neustálém provozu je zajištěno dynamickým tlumením. [16]



Obrázek č. 20 VAST gold [16]

VAST XTR gold



Obrázek č. 21 VAST XTR gold [17]

VAST XTR gold vychází z konstrukce senzoru VAST XT gold. Hlavním odlišením od modelu gold je integrovaná rotační osa v podobě otočného kloubu, která umožňuje snímačem otáčet i po upnutí po stupnici 15ti stupňů, je tedy částečně otočná. Funkce VAST navigator, která je senzorem VAST gold plně podporována, je speciální opce, která navrhuje uživateli optimální rychlost měření pro požadovanou přesnost. Funkce VAST performance pak umožňuje skenování snímačem přes přerušené kontury bez snížení rychlosti či přesnosti.

[17]

Firma Hexagon

HP-S-X1



Obrázek č. 22 HP-S-X1 [18]

Tyto otočné skenovací sondy nabízí přesnost měření pevných hlav, ale mohou být nasazeny i na automaticky indexovatelné hlavy a použity na měření bod po bodu nebo na kontinuální skenování. Obsahují velmi citlivé snímače a mají značný rozsah lineárního měření, díky kterému lépe vyhodnotí data měření. Disponují také automatickou výměnou doteků bez potřeby opětovné kalibrace. Dotyky lze použít s délkou od 20 do 225 mm.

[18]

LSP - S2



Obrázek č. 23 LSP - S2 [19]

Tato snímací sonda umožňuje většinu standardních režimů snímání, jako například bodové měření, automatické skenování nebo automatické vystředění. Umožňuje vysokorychlostní skenování s nastavci o délce až 800mm, takže je vhodný i pro měření uvnitř dílů. Díky proměnným diferenciálním převodníkům jsou přesně měřeny i výchylky při snímání. [19]

Firma Renishaw

SP25M



Obrázek č. 24 SP25M [20]

Tento snímač poskytuje díky pěti výměnným modulům optimalizovat měřicí výkon pro doteky do délky 400mm. Disponuje skenovacím i spínacím dotykovým měřením. Její nejvhodnější využití je měření profilů a tvarů. Díky použití motorických indexovatelných hlav je měření flexibilnější a časově méně náročné. [20]

SP600

Řada SP600 sestává ze tří modelů skenovací sondy:



Obrázek č. 25 SP600



Obrázek č. 26 SP600M



Obrázek č. 27 SP600Q [21]

Tato řada nabízí rychlost skenování až 300mm/s a také rychlé bodové měření. Jejich konstrukce je robustní, díky čemuž zajišťují i odolnost vůči malým nárazům. Spínací síly jsou velmi nízké, a mají tudíž vysokou flexibilitu využití. [21]

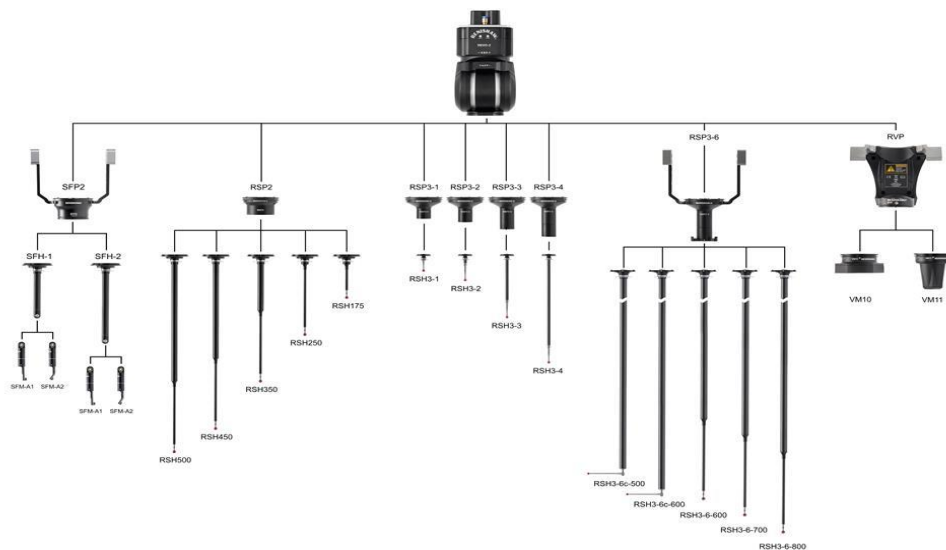
SP80 a SP80H



Obrázek č. 28 SP80 [22]

Tato sonda může využívat doteky až o délce 1000mm a hmotnosti 500g, díky čemuž je vhodná pro měření v hloubkách měřených součástí. Je možno používat i hvězdicové konfigurace snímačů bez použití protizávaží. Odezva snímačů je velmi rychlá díky odpružení hmoty v sondě. [22]

Pětiosý měřicí systém REVO



Obrázek č. 29 Pětiosý měřicí systém REVO [23]

Systém REVO využívá synchronizovaného pohybu pěti řízených os. Ty dokáží při velmi vysokých rychlostech měření minimalizovat dynamické efekty setrvačnosti stroje. Tento pětiosý měřicí systém se třemi osami a dvěma rotačními osami hlavy je integrován do řídicího systému CMM Renishaw.

Příklady využití:

- Měření sedel a vedení ventilů pomocí REVO
 - Spirálové skenování (helical scan)
 - Adaptivní skenování
- Měření lopatek

[23]

4.2 Bezkontaktní snímací systémy

Bezkontaktní snímací systémy nahrazují tradičnější kontaktní snímací systémy v aplikacích, kde je vyžadována vyšší rychlost nebo kde jsou vlastnosti materiálu nevhodné pro kontaktní měření. Tyto systémy jsou podstatně rychlejší a shromažďují velké množství datových bodů. [1]

Rozdělení:

- kamerové
- triangulační senzory
 - laserscanner
 - proužkové projekce
 - fotogrametrie
- senzory pro měření vzdálenosti
 - WLI

4.2.1 Kamerové snímací systémy

Kamerové snímací systémy jsou vhodné pro měření dílů s velmi malými nebo dvourozměrnými geometrickými prvky a dílů z měkkých materiálů jako plech, pryž nebo plast. S použitím doplňkových mobilních stolků s procházejícím světlem s LED osvětlením se dají provádět i obtížná měření málo kontrastních měřených objektů, jako jsou plechové výstřižky, desky plošných spojů. [25]

Konkrétní příklad:

HP-C-VE Vision Sensor



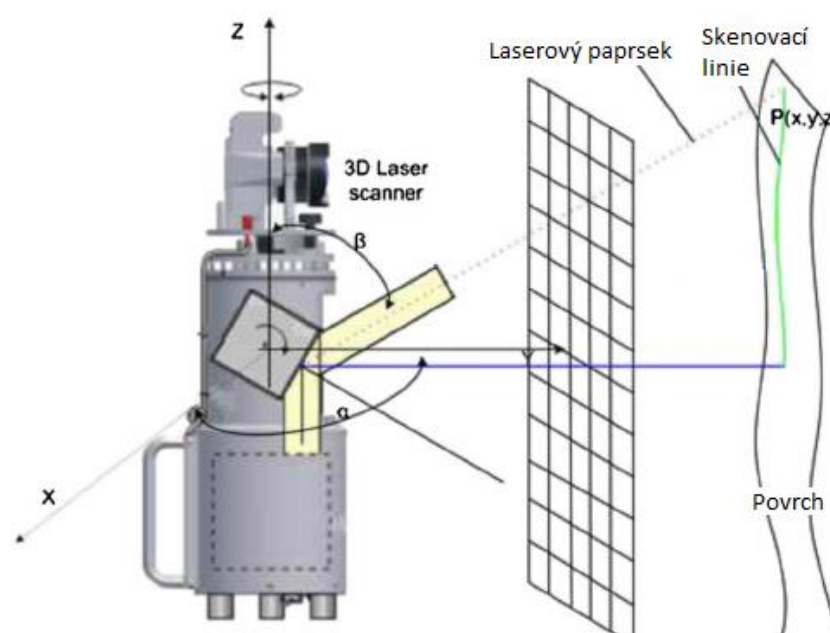
Obrázek č. 30 HP-C-VE Vision Sensor [26]

HP-C-VE je kamera od firmy Hexagon pro souřadnicové měřicí stroje. 2D světlo-citlivý CCD snímač a integrované LED osvětlení osvětlují a zobrazují oblast na měřené součásti, čímž je umožněno optické měření rozměrných dílů.

K výběru jednoho či více prvků pro měření (např. průměry otvorů, polohy hran) lze použít úplné zorné pole nebo konkrétní oblasti zájmu v rámci tohoto pole. Softwarové ovládání osvětlení umožňuje uživatelům optimalizaci obrazu pro každé prováděné měření. Nejčastěji se kamerový snímací senzor HP-C-VE používá na měření drobných prvků, které se obtížně měří dotykovými sondami, na součásti které jsou snadno deformovatelné nebo například pro měření desek plošných spojů. [26]

4.2.2 Triangulační senzory

Laser scanner



Obrázek č. 31 Schéma měření laser scanneru [39]

Skenování funguje tak, že se proti předmětu vyšle laserový paprsek. Ten se při kontaktu s předmětem odrazí a vrátí se zpět, tedy do skenovacího zařízení, které ho poté vyhodnocuje. Vzdálenost se určuje podle doby, kterou paprsek urazí od jeho vyslání po navrácení zpět do skenovacího zařízení. Z úhlu, pod kterým se paprsek vrací zpět do zařízení, vyhodnocujeme zakřivení povrchu. Spojením těchto informací získáváme přesnou polohu bodu, kterou skener odešle pomocí softwaru do počítače. Tímto způsobem snímáme buďto skenerem okolo součásti, popřípadě otáčíme součást před skenerem. [27]

Konkrétní příklad:

T-SCAN

Ergonomický design a mobilita všech systémových komponent umožňují digitalizaci ploch i pro velké objekty. Modulární koncepce laserového skeneru a trackeru zajišťuje rychlý sběr 3D dat pro různé oblasti použití (konstrukce, rapid prototyping, rapid tooling, reverzní inženýrství). Používá se také například pro skenování uměleckých historických předmětů i lékařské techniky. [28]

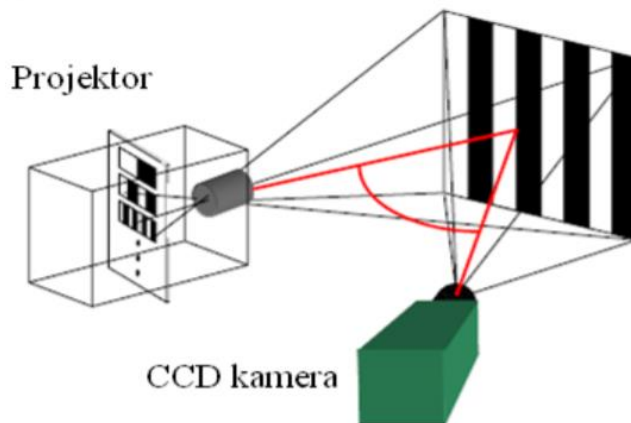


Obrázek č. 32 T-SCAN [28]

Pruhová projekce

Někdy je z různých důvodů snímání objektu pro techniku náročné. Proto se občas používá pomocných značek, které se na ně umístí a s jejichž pomocí systém vypočte pozici měřících kamer. To vede k přesnějšímu sestavení 3D modelu. Ideální je vytvořit co nejvíce kontrastní pozadí ke snímané součásti, aby při měření nesplývala s prostředím.

Proužková projekce probíhá tak, že se na povrch měřené součásti promítají proužky světla (pomocí projektoru) a pomocí jedné a až dvou kamer se objekt snímá. Souřadnice bodů se poté vyhodnocují podle úhlů, které mezi sebou paprsky svírají. Pro přesné výsledky měření se na povrch součásti postupně promítají různé vzory. [29]



Obrázek č. 33 Schéma měření pruhovou projekcí [29]

Konkrétní příklad:

Zeiss COMET

Senzory Zeiss COMET se díky modulární koncepci hodí pro sběr 3D dat v oblastech zajišťování kvality. Konkrétní využití má v oblastech porovnávání naměřených hodnot s CAD modely, v konstrukci, v rapid manufacturingu a reverzním inženýrství. [30]



Obrázek č. 34 Zeiss COMET [30]

Fotogrammerie

Fotogrammerie patří mezi optické měřičské metody využívající světlo jako nosič informace. Je to taková měřicí metoda, která nám umožňuje určit tvar, velikost nebo polohu měřené součásti v prostoru. Docílíme toho pomocí jednoho či více obrazových, nejčastěji fotografických, záznamů. Hlavním úkolem je získání třírozměrné rekonstrukce

měřeného objektu v digitální podobě (souřadnice a geometrické parametry) nebo grafické formy (obrazy, plány, mapy). Jako nosič informace slouží světlo. [31]

Konkrétní příklad:

Viva TS11

Tento fotogrammetrický měřicí stroj slouží k měření velkých vzdáleností, například při měření terénu. Dosahuje délkové přesnosti: 1 mm + 1,5 ppm (dílů na jeden milion) na hranol a 2 mm + 2 ppm bez hranolů. Dosah dálkoměru je až 3 500 m na hranol. [40]



Obrázek č. 42 Viva TS11 [40]

4.2.3 Senzory pro měření vzdálenosti

White Light Interferometry

Interferometrie bílého světla je interferometrická měřicí metoda, která používá světlo s velkou šířkou spektra. Český název této metody pochází z anglického názvu white-light interferometry. Tato metoda slouží především k proměřování výškových profilů technických předmětů. WLI dosahuje, jako jedna z mála metod na měření povrchů, nejistot okolo 1 μ m. Jako zdroj se využívají především různé druhy LED diod. [32] [33]

Konkrétní příklad:

PRECITEC

PRECITEC společnosti Hexagon Metrology je senzor využívající zaostřené bílé světlo. Využívá se k měření složitých, křehkých a měkkých povrchů, matných, reflexních a potahovaných plastů, skla a jiných průhledných materiálů. Měření je prováděno na kratší vzdálenost. [34]



Obrázek č. 35 PRECITEC [34]

5. Měření zadaných součástí

Postup kontroly součásti na CMM

Nejprve je třeba analyzovat výkresovou dokumentaci. Po její studii přesně definujeme upnutí, aby nedocházelo k nepřesnostem způsobeným nechtěným pohybováním měřené součásti. Poté provedeme konfiguraci a kalibraci snímacího systému a vyrovnání součásti. Následně dochází k extrakci bodů a definování geometrických prvků, výpočtu rozměrových a tvarových specifikací (metoda výpočtu, filtrace,...). Po provedení měření následuje jeho vyhodnocení a následná tvorba protokolů. [3]

Cílem práce bylo vyzkoušet rozměrovou kontrolu vybraných součástí s využitím různých typů snímacích systémů. Měření jsem prováděl na dvou soustružených šachových figurkách, figurce krále a pěšáka. Na figurce krále bylo zadáno porovnat rozměry kříže, rádiusy a tvar postranní křivky s modelem CAD. Na figurce pěšáka jsem pak porovnával rozměry vrchní koule, některé úhly zkosení a rádiusy dlouhých křivek.



Obrázek č. 36 CAD model – král



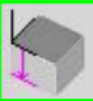







Obrázek č. 37 CAD model - pěšák

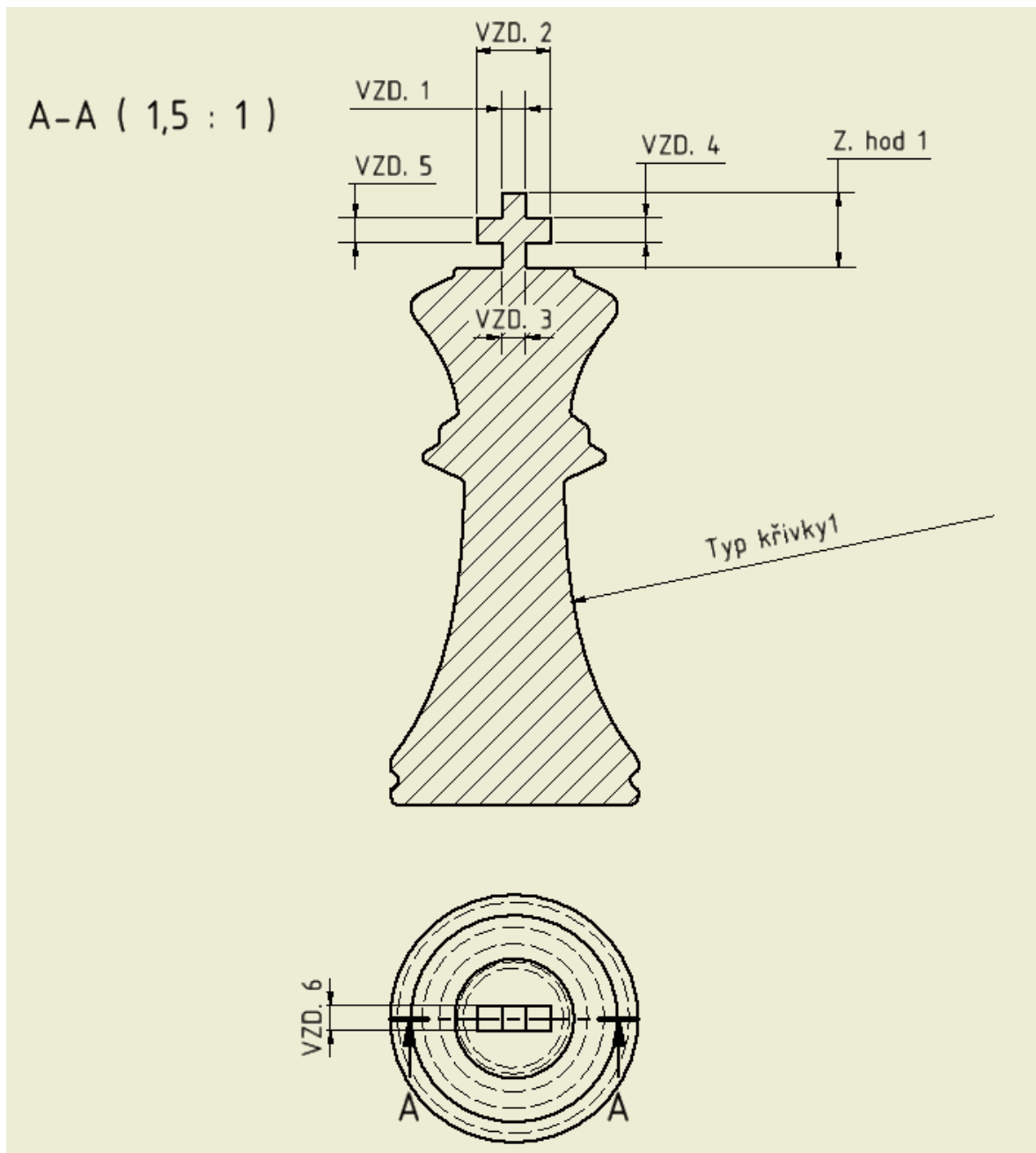
5.1 Měření s využitím dotykového snímacího systému

Na figurce krále jsem pomocí kontaktního snímače na souřadnicovém měřicím stroji ZEISS PRISMO 7 Vast měřil bodově rozměry horního kříže. Poté jsem na stejném stroji měřil dotykovým skenováním odchýlení delší křivky „těla“ figurky a porovnával je s CAD (computer-aided design, česky počítačem podporované projektování) dokumentací, kterou jsem k měření dostal od vedoucího práce. Vyhodnocení jsem provedl v softwaru Calypso. Kde se jednotlivé naměřené rozměry na součásti nacházejí, jsem poté zakreslil ve výkresové funkci programu Autodesk Inventor 2018. Jako počáteční (nulový) bod pro souřadný systém jsem zvolil vrchol kříže na hlavě krále.

Protokol měření z Programu Calypso (Prismo) :

	<h2 style="margin: 0;">ZEISS Calypso</h2>			
	Datum 28 Juni 2018			
Plán měření Kral_dotykem			Zakázka	
Operátor Vladimir Sulc	Stroj Prismo		Č.dílu inkrementálně 1	

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 Z hod.1 -9.0346	-9.0000		0.1000	-0.1000	- - -0.0346
 Vzdálenost6_Y 2.9685	3.0000		0.1000	-0.1000	- - -0.0315
 Vzdálenost1_X 2.9744	3.0000		0.1000	-0.1000	- - -0.0256
 Vzdálenost2_X 8.9683	9.0000		0.1000	-0.1000	- - -0.0317
 Vzdálenost4_Z 2.8279	3.0000		0.1000	-0.1000	-0.0721 -0.1721
 Vzdálenost5_Z 2.8242	3.0000		0.1000	-0.1000	-0.0758 -0.1758
 Vzdálenost3_X 2.9968	3.0000		0.1000	-0.1000	- -0.0032
 Typ křivky1 0.0559 Typ tolerance: Standard	0.0000		0.1000	-0.1000	-- 0.0559



Obrázek č. 38 Výkres – figurka krále

Poté jsem měřil rádiusy vyskytující se na hraně figurky krále pomocí konturografu MarSurf LD 120. Jejich jmenovité hodnoty jsem vygeneroval pomocí modelu CAD a v tabulce je porovnal s těmi naměřenými na konturografu.

Měření konturografem se provádí formou skenování povrchu měřené součásti. Protože je proces snímání zcela kontinuální, jsou eliminovány nepřesnosti, které by jinak vznikaly z důvodu vzdálenosti mezi jednotlivými měřenými body.

Skenovací hlava je umístěna na rameni, které se posouvá ve směru měření součásti. Hlava je nejčastěji zakončena diamantovým hrotem, který je takřka bez zaoblení. Jak se hrot pohybuje po součásti, je každá výchylka mnohonásobně zvětšena a zaznamenána ve formě profilografů. Před začátkem měření je třeba se ujistit, že je rovina snímání kolmá k měřené kontuře. Jako výsledek měření dostáváme profil v rovině řezu. [35]

Konkrétní příklad:

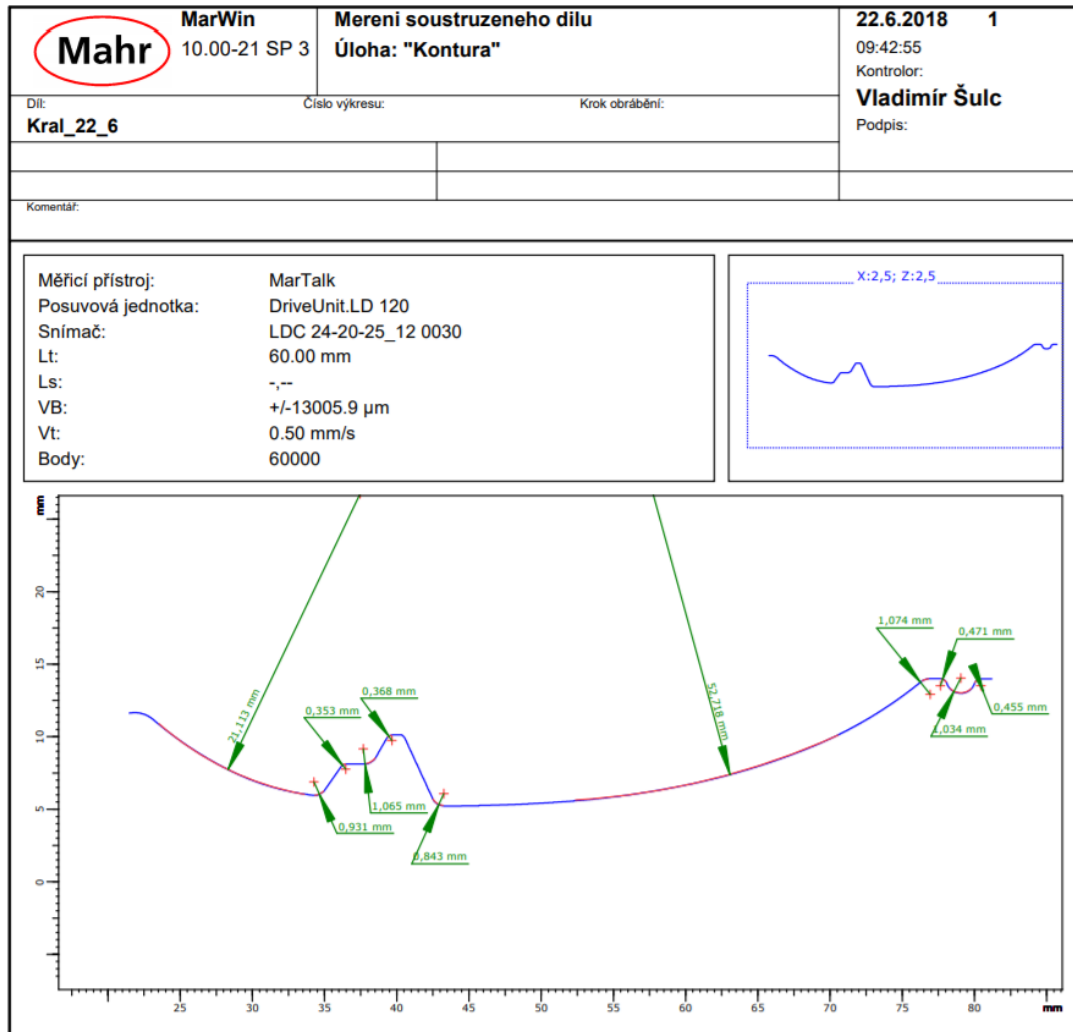
MarSurf XC 20

Prostřednictvím měřicího a vyhodnocovacího softwaru je řízena a polohována jak posuvová jednotka, tak i měřicí stojan. Tento konturograf je schopen měřit horní i spodní struktury pomocí dvouhrotových snímačů, a ty pak vzájemně vyhodnocovat. Nabízí také možnost segmentovaného měření, což je vhodné například při měření součástí obsahující díry. Profily je možné synteticky vytvářet z přímků i kruhových oblouků a je možno v rámci jednoho profilu zvolit i více tolerancí. [36]



Obrázek č. 39 MarSurf XC 20 [36]

Protokol měření na konturografu:












Tabulka 2 Odchylky naměřené na konturografu

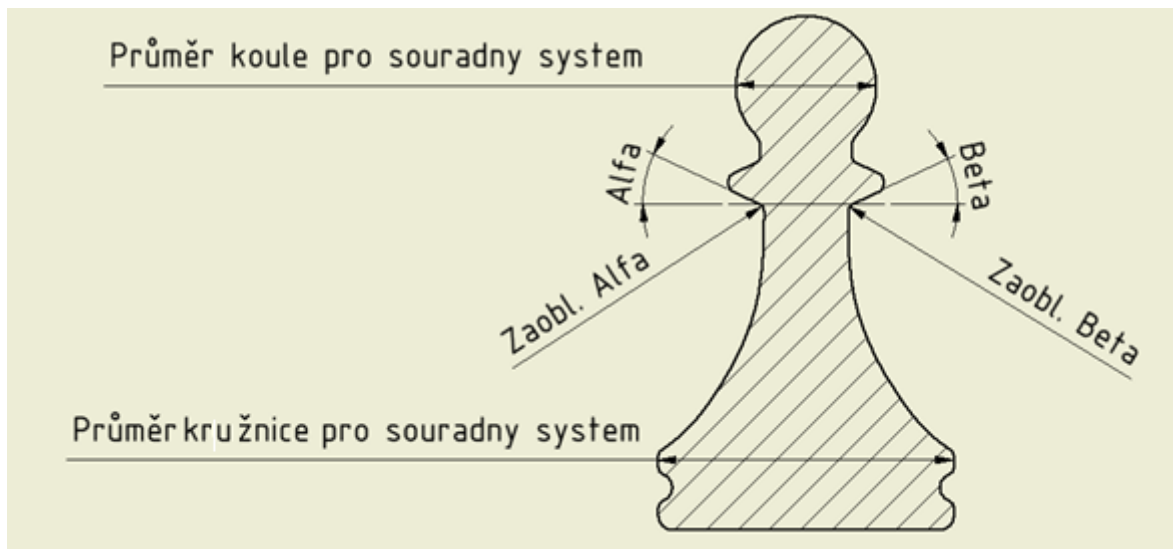
Nominální hodnota radiusu podle modelu CAD [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka [mm]
20,81	21,113	-0,303
0,5	0,931	-0,431
0,5	0,353	0,147
0,5	1,065	-0,565
0,5	0,368	0,132
0,5	0,843	-0,343
52,34	52,718	-0,378
1	1,074	-0,074
0,5	0,471	0,029
1	1,034	-0,034
0,5	0,455	0,045

5.2 Měření s využitím kamerového snímacího systému

Figurku pěšce jsem měřil na stroji ZEISS O-INSPECT. Měřil jsem pomocí dvou metod, a to dotykovým snímačem a poté pomocí optického snímače. Pro zavedení souřadného systému jsem měřil průměr obvodové kružnice na dolní části figurky a rozměry horní koule na hlavě pěšce. Tu jsem měřil oběma metodami, abych mohl výsledky měření porovnat. Poté jsem změřil úhly zkosení, zaoblení pod těmito úhly a také rádius dlouhé křivky. Stejně jako v případě krále bylo vyhodnocení provedeno v programu Calypso. Náhled, ve kterém je zobrazeno, kde se měřené rozměry nacházejí, je opět ve výkresovém programu Autodesk Inventor 2018.

Protokol měření z Programu Calypso (O-INSPECT):

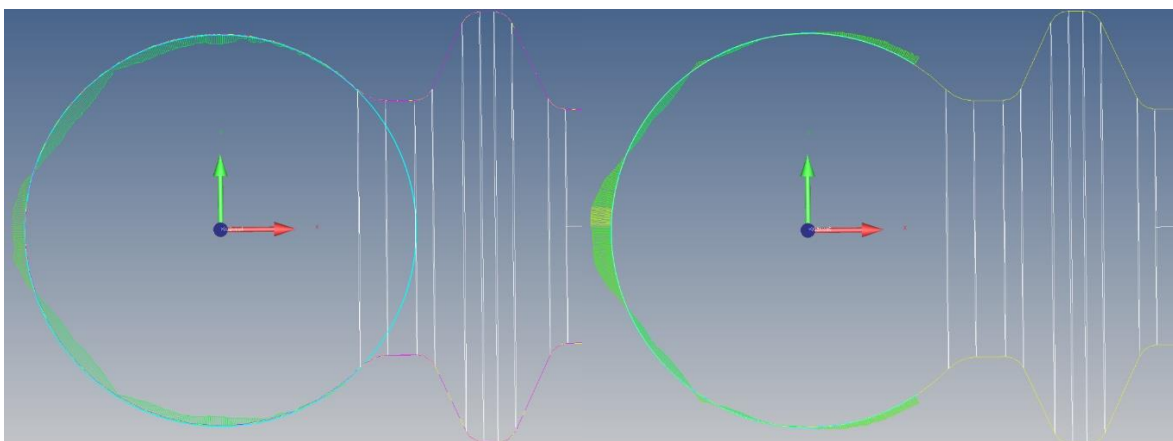
ZEISS Calypso		ZEISS			
Plán měření Pesec	Datum 28. Juni 2018				
Číslo výkresu * drawingno *	Čas 14:43:53	Zakázka			
Operátor Master	Stroj C32Bit	Č. dílu inkrementálně 1			
Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka	
 Průměr_Kružnice pro souradny system 21.0099	21.0000	0.1000	-0.1000	- 0.0099	
 Průměr_Koule pro souradny system 10.0080	10.0000	0.1000	-0.1000	- 0.0080	
 Odchylka tvaru 2D křivky 0.1225 Typ tolerance: Standard	0.0000	0.1000	-0.1000	--- 0.1225	
 Proj.úhel 2-_2D Beta -25.3345	-25.0000	0.5000	-0.5000	--- -0.3345	
 Proj.úhel 2-_2D Alfa 25.3183	25.0000	0.5000	-0.5000	--- 0.3183	
 Průměr_Kružnice zaobleni pod uhlem Alfa 1.7550	1.7550	0.2000	-0.2000	0.0000	
 Průměr_Kružnice zaobleni pod uhlem Beta 1.7736	1.7736	0.0500	-0.0500	0.0000	
 Průměr_Kružnice4 9.9879	10.0000	0.1000	-0.1000	- -0.0121	
 Průměr_Kružnice5 10.0051	10.0000	0.1000	-0.1000	- 0.0051	



Obrázek č. 40 Výkres – figurka pěšáka

Jak už jsem uvedl výše, kouli jsem na vrcholu pěšce jsem měřil jak dotykovým snímáním (bodově i skenováním), tak optickým snímáním. V protokolu vygenerovaném v programu Calypso odpovídají jednotlivým měřením tyto hodnoty:

- **Dotykové skenování** = Průměr_Kružnice5 = 10,0051 mm
- **Dotykové bodové snímání** = Průměr_Koule pro souradny system = 10,0080 mm
- **Snímání optikou** = Průměr_Kružnice4 = 9,9879 mm



Obrázek č. 41 Grafické porovnání odchylek při měření optikou (vlevo) a dotykem (vpravo)

Protože se výsledky při měření dotykem a optikou výrazně lišily, upravil jsem odchylky nastavením některých parametrů v softwaru Calypso a zjistil, o kolik se budou hodnoty lišit. Konkrétně jsem upravoval tři parametry: typ hrany, odlehlou hodnotu a hodnotu filtru. U odlehlé hodnoty a hodnoty filtru jsme vždy mohli nastavit hodnoty na stupnici 0-100 bodů.

U typu hran jsme mohli nastavit tři různé typy:

- Stoupající i klesající
- Klesající
- Stoupající

Výsledky měření při změnách typu hran [mm]:

Stoupající i klesající:



Průměr_VH_stuopajici_klesajici
9.9876

Klesající:



Průměr_VH_klesajici
10.0461

Stoupající:



Průměr_VH_stoupajici
9.9910

Dále jsem vyzkoušel rozdíly, které vzniknou při změnách hodnoty filtru a změně odlehlé hodnoty. Použil jsem nastavení typu hran “stoupající i klesající hrany”.

Výsledky měření při změnách hodnoty filtru (při změně odlehlé hodnoty 10):

- 10%: 9,9877 mm
- 50%: 9,9912 mm
- 100%: 9,9924 mm

Výsledky měření při změnách odlehlé hodnoty (při změně hodnoty filtru 10):

- 10%: 9,9877 mm
- 50%: 9,9840 mm
- 100%: 9,9881 mm

6. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala využitím souřadnicové měřicí techniky při kontrole kvality. Na začátek jsem uvedl některé základní pojmy z oblasti kvality. Následně jsem se věnoval rozdělení kartézských CMM podle jejich konstrukčního typu. Stručně jsem popsal, jak jednotlivé typy fungují a uvedl jejich konkrétní příklady.

V další části své práce jsem uvedl rozdělení sensoriky na kontaktní a bezkontaktní a také jak funguje bodové a skenovací snímání. Popsal jsem principy jednotlivých snímacích systémů, jejich využití a uvedl systémy dostupné od různých poskytovatelů.

Následně jsem navrhl měření na CMM při kontrole rozměrů zadaných součástí. Porovnával jsem hlavně naměřené hodnoty s hodnotami z CAD modelu. Poté jsem porovnal i dvě různé měřicí metody (dotykovou a optickou) na jednom konkrétním rozměru na figurce pěšce. Při použití optického snímače jsem vyzkoušel i vliv různých nastavení softwaru na výsledky měření. Hodnoty se podle nastavení lišily i v řádech setin milimetru. U optického měření je nejbližší našim naměřeným hodnotám dotykovou metodou rozměr vyhodnocený při použití klesajícího typu hran.

Z výsledků měření je zřejmé, že optická metoda měření není optimální pro měření součástí všech tvarů. V našem případě spočíval hlavní problém pravděpodobně v tom, že jsme měřili rotační součást, takže zaoblené hrany do jisté míry zkreslovaly výsledky měření. Přestože je tedy měření optickými snímači jistě rychlejší, tak jde-li o přesnost, je vhodnější se u tvarově složitějších součástí spoléhat na dotykové měření.

7. Seznam použité literatury

- [1] FLACK, David. 2014. Measurement Good Practice Guide No. 43, CMM probing, ISSN 1368-6550 [online]. Dostupné z <http://www.npl.co.uk/publications/guides/cmm-probing>.
- [2] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. 4. Přeprac. A rozš. Vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- [3] BERÁNEK, Libor. Úvod do metrologie [PDF prezentace, studijní opora k předmětu Strojírenská metrologie]. 2017 [cit. 30.07.2018]. Interní dokument.
- [4] Co je MES: Mescentrum. Úvod [online] 2012 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://mescentrum.cz/o-projektu/co-mes>
- [5] EDITED BY ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. Coordinate measuring machines and systems. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.
- [6] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN isbn978-80-248-2514-4.
- [7] ZEISS PRO - | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018] Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/pro-and-pro-t.html>
- [8] DEA BRAVO Console | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/horizontal-arm-cmms/dea-bravo-console>
- [9] ZEISS DuraMax | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018] Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/production-cmms/duramax.html>
- [10] TIGO SF | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/shop-floor-cmms/tigo-sf>
- [11] ZEISS PRISMO | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo.html>
- [12] ZEISS MMZ E | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/large-cmms/mmz-e.html>
- [13] DEA ALPHA | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 30.07.2018] Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-alpha>
- [14] HRBKOVÁ, Eliška. Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM. Praha, 2016. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.

- [15] ZEISS VAST XXT | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-xxt.html>
- [16] ZEISS VAST gold | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-gold.html>
- [17] ZEISS VAST XTR gold | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-xtr-gold.html>
- [18] HP-S-X1 Skenovací sondy | Hexagon Manufacturing Intelligence. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/scanning-probes/hpsx1-scanning-probes>
- [19] LSP-S2 | Hexagon Manufacturing Intelligence. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/scanning-probes/lsp2>
- [20] SP25M | Renishaw. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sp25m--6688>
- [21] SP600 | Renishaw. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sp600--6687>
- [22] SP80 a SP80H | Renishaw. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sp80-a-sp80h--6686>
- [23] Pětiosý měřicí systém REVO | Renishaw. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/petiosy-merici-system-revo--10438>
- [24] HUTYRA, Milan. Management jakosti [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2018-07-30]. ISBN isbn978-80-248-1484-1.
- [25] ZEISS dotykové a optické senzory | ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory.html>
- [26] HP-C-VE Vision Sensor | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/multisensor-and-optical-systems/hpcve-vision-sensor>
- [27] Šimoník, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení, MM Průmyslové spektrum. [online]. 2004. [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [28] T-SCAN. ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://optotechnik.zeiss.com/cz/produkty/3d-skenovani/laserove-skenovani>
- [29] PALÁSEK, Vítězslav. SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE (CMM) S OPTICKÝM SNÍMACÍM SYSTÉMEM A OPTICKÉ CMM. Brno, 2009. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.

- [30] ZEISS COMET. ZEISS [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-systems/3d-scanning/zeiss-comet.html>
- [31] SVATÝ, Zdeněk. VYUŽITÍ FOTOGRAMMETRIE VE ZNALECKÉ PRAXI. Praha, 2012. Bakalářská práce. Fakulta dopravní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
- [32] PAVLÍČEK, Pavel. Vybrané optické problémy týkající se 3D senzorů. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN isbn978-80-244-3108-6.
- [33] MIKESKA, Erik. Interferometrie v bílém světle s vysokým stupněm podvzorkování. Olomouc, 2016. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
- [34] Optické snímače PRECITEC | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/non-contact-sensors/precitec-lr-optical-sensor>
- [35] HOLEČEK, Matěj. Opotřebenění nástroje pro výrobu ostré designové hrany výlisku. Praha, 2016. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [36] MarSurf XC 20 - Mahr Metrology [online]. 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-slu%C5%BEby/V%C3%BDrobn%C3%AD-m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---P%C5%99%C3%ADstroje-na-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-kontury/MarSurf-XC-20/>
- [37] Leitz Infinity | Hexagon Manufacturing Intelligence. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/leitz-infinity>
- [38] PARK, Jae-jun et al. Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor. 2006 Meas. Sci. Technol. 17 2380. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/17/9/002>.
- [39] Li, Baoshun & Cao, Qixin & Zhang, Lei & Lee, Jay & Leng, Chuntao & Li, Yaoliang. (2010). 3D Surface Modeling and Measuring System for Pneumatic Caisson. Journal of Computing in Civil Engineering - J COMPUT CIVIL ENG. 24. 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000023.
- [40] GEFOS - Viva TS11. GEFOS a.s. [online] 2018 [cit. 30.07.2018]. Dostupné z: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/230/viva-ts11>

8. Seznam obrázků

Obrázek č. 1	Informační systémy [4]
Obrázek č. 2	Stojanový typ CMM [6]
Obrázek č. 3	PRO [7]
Obrázek č. 4	DEA BRAVO Console [8]
Obrázek č. 5	Výložníkový typ CMM [6]
Obrázek č. 6	Dura Max [9]
Obrázek č. 7	TIGO SF [10]
Obrázek č. 8	Portálový typ CMM [6]
Obrázek č. 9	Prismo [11]
Obrázek č. 10	Leitz Infinity [37]
Obrázek č. 11	Mostový typ CMM [6]
Obrázek č. 12	MMZ E [12]
Obrázek č. 13	DEA ALPHA [13]
Obrázek č. 14	Rozdělení snímacích systémů [3]
Obrázek č. 15	Dotykový snímací systém [5]
Obrázek č. 16	Moment snímání měřeného bodu [38]
Obrázek č. 17	Kinematické schéma kontaktní sondy – rozpojení kontaktu [6]
Obrázek č. 18	Konstrukce aktivní pevné skenovací hlavy [3]
Obrázek č. 19	VAST XXT [15]
Obrázek č. 20	VAST gold [16]
Obrázek č. 21	VAST XTR gold [17]
Obrázek č. 22	HP-S-X1 [18]
Obrázek č. 23	LSP - S2 [19]
Obrázek č. 24	SP25M [20]
Obrázek č. 25	SP600 [21]
Obrázek č. 26	SP600M [21]
Obrázek č. 27	SP600Q [21]
Obrázek č. 28	SP80 [22]
Obrázek č. 29	Pětiosý měřicí systém REVO [23]

Obrázek č. 30	HP-C-VE Vision Sensor [26]
Obrázek č. 31	Schéma měření laser scanneru [39]
Obrázek č. 32	T-SCAN [28]
Obrázek č. 33	Schéma měření pruhovou projekcí [29]
Obrázek č. 34	Zeiss COMET [30]
Obrázek č. 35	PRECITEC [34]
Obrázek č. 36	CAD model - král
Obrázek č. 37	CAD model - pěšák
Obrázek č. 38	Výkres – figurka krále
Obrázek č. 39	MarSurf XC 20 [36]
Obrázek č. 40	Výkres – figurka pěšáka
Obrázek č. 41	Grafické porovnání odchylek při měření optikou (vlevo) a dotykem (vpravo)
Obrázek č. 42	Viva TS11 [40]

9. Seznam tabulek

Tabulka 1	Rozdělení geometrických tolerancí [3]
Tabulka 2	Odchyly naměřené na konturografu