VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF

TITLE Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs

Evaluation of Control Measuring Machine (CMM) and Coordinate Measuring Machines (CMMs)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — DAVID DOLÁK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MIROSLAV OPL
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Dolák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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

Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs.

v anglickém jazyce:

Evaluation of Control Measuring Machine (CMM) and Coordinate MeasuringMachines (CMMs).

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku postprocesní popř. inprocesní kontroly obrobků na speciálních souřadnicových strojích nebo pomocí nástavbových skenovacích systémů. Problematika kontaktních a bezkontaktních automatických způsobů měření objektů.

Cíle bakalářské práce:

1. Na základě literárních a internetových zdrojů proveďte rešerši souřadnicových měřících strojů, a to jak pro automatické tak i ruční skenování objektů.
2. Uveťe základní rozdělení měřících subsystémů a nástavbových systémů pro CMM včetně jejich aplikace v průmyslu.

Seznam odborné literatury:

www.renishaw.cz
www.mitutoyo-czech.cz
www.metrotest.cz
www.schut.com

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Opl

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Ředitel ústavu	Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší souřadnicových měřících strojů používaných v mnoha různých odvětvích průmyslu, vědy, ale také lékařství. Hlavní strukturu práce tvoří seznámení s těmito stroji, jejich historie a stvaba konstrukce. Závěr práce je věnován oblastem, kde se tyto stroje dají nalézt a současné trendy týkající se této problematiky.

Klíčová slova

Měření, souřadnice, osy, sondy, doteky, kontrola

ABSTRACT

This is a bachelor´s thesis concerning the retrieval of coordinate measuring maschines used in many different industries, in the science, but in medicine also. The main structure of the work consist of familiarization with these machines, thein history and construction. Conclusion of the work is devoted to areas where these machines can be found and current trends to be concerned with this problems.

Key words

Measuring, coordinates, axes, probes, touches, control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLÁK, D. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs.*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum .....

David Dolák

Obsah

Úvod 7

1. Definice CMM 8
1.1. CMM – Coordinate Measuring Machine 8
1.2. Základní vlastnosti měřitelné pomocí těchto strojů: 9
1.3. CMMs – Měřící ramena 9
1.4. Důvody použití 10

2. Historie CMM a vývoj 11
2.1. Globální producenti 12

3. Konstrukční uspořádání 15
3.1. Části měřícího řetězce 15
3.2. Hlavní konstrukce CMM 15
3.3. Měřící sondy 18
3.4. Měřící doteky 19
3.5. Řídící systém 21
3.6. Příslušenství 21

4. Oblasti použití 22

5. Současné trendy v oblasti CMM 24
5.1. Tříosé skenování 24
5.2. Pětiosé měření 24
5.3. Firemní nabídka 25

6. Závěr 27

7. Seznam použitých zdrojů 28

8. Seznam použitých zkratek 29

9. Seznam obrázků 30

Úvod

V oblasti technologie, ať už jakéhokoliv směru, dochází k aplikaci poznatků ze širokého okruhu vědních oborů, jako je fyzika, matematika nebo chemie, a tak je zde stále potenciál ke zdokonalování již tak na první pohled téměř dokonalého.

K tomu velkou měrou přispívá také využití počítačových technologií, kdy neustálý vývoj jak CNC obráběcích, CNC kontrolních strojů a jejich řídících systémů zajišťuje stále nové možnosti zlepšování jejich pracovních procesů. Díky tomu se tyto pracovní procesy urychlují, zpřesňují, zvyšuje se u nich efektivita a kvalita.

Jednou z oblastí kde se snoubí vše výše jmenované, je měření geometrických vlastností objektů, které lze měřit na laboratorní nebo výrobní úrovni, dle požadavků na výsledek. Dalším potřebným hlediskem, které je nutné brát do úvahy je velikost měřeného objektu. Je rozdíl mezi pístem a celým automobilem. Tak či tak se pro tyto úkony v obrovské míře používají souřadnicové měřící přístroje, člověkem nebo počítačem řízené.

Popis jejich konstrukce, vlastností a oblastí využití je uveden v následujícím textu

1. Definice CMM

1.1. CMM – Coordinate Measuring Machine

V českém překladu se jedná o souřadnicové měřicí stroje (dále jen CMM). Jedná se o zařízení pro měření geometrických vlastností různých objektů a zařízení, používaných ve výrobních

a montážních procesech. Obecně jsou to zařízení pro testování dílu nebo sestavy, jestli odpovídají předem stanoveným požadavkům. Stroj může být řízen jak ručně provozovatelem (operátorem), tak pomocí počítače. Měření jsou definována sondou mechanicky nebo jinak propojenou k třetí pohybující se ose stroje. Sondy mohou být mechanické, optické, laserové a další.

Obr. 1 CMM od fy Mitutoyo [1]

Základním principem je zjišťování souřadnice X, Y a Z jednotlivých bodů objektu. Tyto body jsou zjišťovány pomocí sondy, která je umisťována ručně (operátorem) nebo automaticky pomocí počítače - Direct Computer Control (dále jen DCC). CMM je možné pomocí DCC naprogramovat tak, aby opakovaně měřily stejné díly, čímž se z těchto CMM stává specializovaná forma průmyslových robotů.

Vezněme v úvahu CMM, který se skládá ze tří os, X, Y a Z. Tyto osy jsou navzájem kolmé v typickém trojrozměrném souřadnicovém systému. Každá osa má systém měřítek, který označuje umístění této osy. Stroj bude číst vstup z dotykové sondy, podle pokynů operátora nebo programátora. Stroj pak používá X, Y, Z souřadnice každého z těchto bodů pro určení přesné velikosti a polohy.

Zdroj [4].

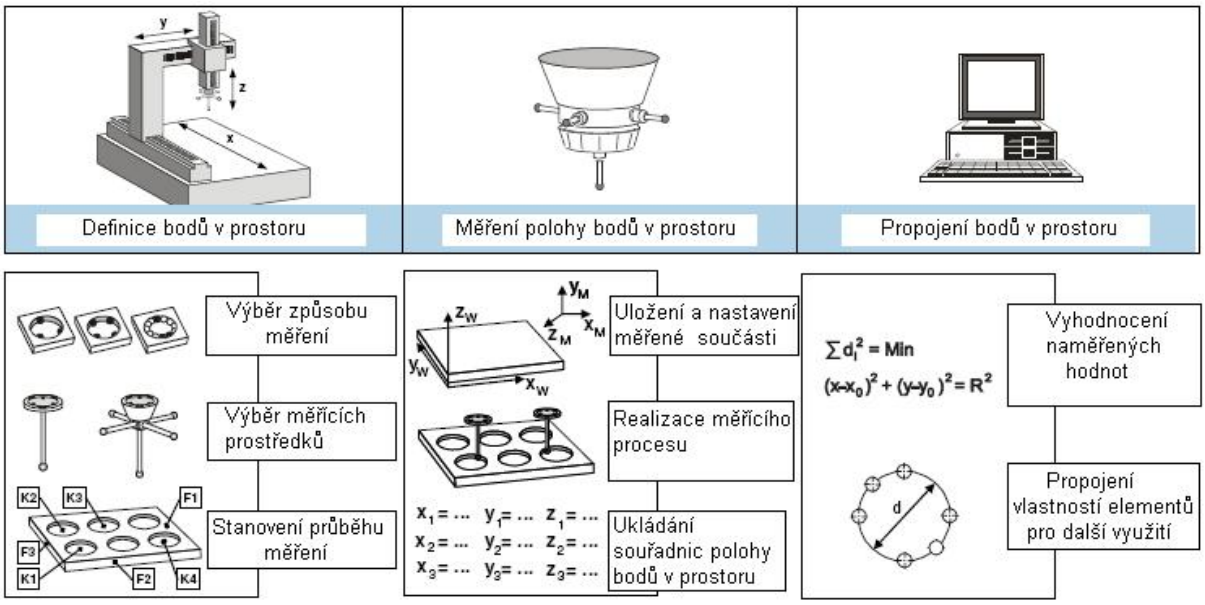
Vlastní postup by se dal pak vyjádřit následovně:

Dle obrázku níže jasné, měřící proces se skládá ze tří důležitých částí.

V první části se jedná o definici bodů měřícího zařízení v prostoru. Této oblasti týká výběr vhodného způsobu měření, výběr vhodných měřících prostředků (sondy a jejich doteky) a nakonec stanovení vhodného průběhu měření, aby měření bylo co nejpřesnější a nejefektivnější.

Druhá část se týká vlastního zkušebního vzorku. V této oblasti dochází k jeho upnutí k měřícímu stolu měřícího zařízení, vlastní realizaci měření jednotlivých bodů na dané součásti a také ukládání informací pro určení vlastní polohy bodu zkušebního vzorku.

V poslední části se jedná o práci s uloženými informacemi, zejména jejich interpretaci – vyhodnocení naměřených hodnot a další využití získaných informací. Díky těmto informacím lze pak získat informace (přímo nebo přepočtem) o základních vlastnostech měřeného vzorku.



Obr. 2 Princip měření pomocí CMM [2]

1.2. Základní vlastnosti měřitelné pomocí těchto strojů:

- Přímost
- Měření roviny povrchu
- Kruhovitost
- Válcovitost
- Vlastnost přímky
- Vlastnost povrchu
- Rovnoběžnost
- Kolmost
- Úhel
- Poloha
- Soustřednost
- Symetrie
- Cyklický provoz
- Axiální excentricita

Zdroj [2].

1.3. CMMs – Měřící ramena

Tyto zařízení jsou konstruována pro měření, kontrolu a digitalizaci v různých odvětvích průmyslu. Hlavním principem je, že převádějí pohyb ze šesti rotačních snímačů na klasický výstup v podobě souřadnic X, Y, Z, který je zpracováván potřebným softwarem (dále jen SW). Díky tomuto uspořádání je pracovním prostorem koule, jejíž průměr je dán délkou ruky (Přenosné souřadnicové měřicí stroje jsou mladé. Dosud se v českém jazyce neustálil jednoduchý název těchto měřidel. Název *Přenosný souřadnicový měřicí stroj* je velmi dlouhý. Anglickému výrazu "arm" nejlépe odpovídá český výraz ruka nebo rameno. Také jednotlivé klouby, kterými jsou stroje vybaveny přebírají názvy kloubů ruky, tj. ramenní - shoulder, loketní - elbow a zápěstní - wrist).

Tyto souřadnicové měřicí stroje se aplikují zejména pro kontrolu součástí, které nelze

přenášet nebo umístit do běžného stacionárního souřadnicového měřicího stroje (CMM). [metrotest]

Měřitelné vlastnosti měřících ramen (CMMs) jsou shodné s vlastnostmi souřadnicového měřicího stroje (CMM).

Zdroj [3].

1.4. Důvody použití

Pro úplnost, dle [2], se musíme také zmínit o výhodách, které nám kontrola a měření pomocí těchto zařízení přináší. Jedná se o důvody, které se týkají geometrie měřených součástí, možností vlastního měření a také o cenové důvody.

Důvody použití z hlediska geometrie součásti

- Pokud měření ve dvou bodech je nedostačující
- Pokud jsou vlastnosti součásti celkově důležité
- Pokud je důležitá poloha součásti vůči ostatním důležitá
- Ověřování shodnosti výrobků (sériová výroba)

Důvody použití z hlediska možností měření

- Složitost měření
- Cena měřidel a jejich montáže
- Schopnost měření tam, kde jiná měřidla již nejsou schopna
- Vysoká přesnost

Důvody použití z hlediska finančních nákladů

- Pokud je vyžadována dokumentace
- Pokud je výroba řízena systémem náhodně vybraných vzorků
- Možnost zefektivnění pomocí automatizace měření u sériové výroby

2. Historie CMM a vývoj

V současném období ekonomické krize, která má celosvětový dopad na všechny oblasti lidské tvorby a života obecně, je těžké předvídat budoucnost CMM. CMM produkty však již dlouho dominují kontrolám kvality ve výrobní oblasti (kontrola součástí) a pokud by zde došlo k nějaké významnější technologické inovaci, tak i přesto zůstane CMM hlavním prostředkem pro hodnocení kvality v tomto směru. Současný trend je přesun CMM měření na výrobní úroveň a mnoho nových výrobků přišlo v posledních letech na trh speciálně se zaměřením na tuto oblast.

Souřadnicový měřící stroj se poprvé objevil na počátku 60. let a průmyslové odvětví se zaměřením na souřadnicové měření byl na světě. Ten první souřadnicový měřící stroj bylo 3D zařízení s jednoduchým zobrazením polohy stroje X, Y, Z.

I když počátky tohoto odvětví sahají až do dvacátých let 19. století, tak dle [4] dlouhé roky trval spor o původního vynálezce souřadnicového měřícího stroje, jehož název byl v průběhu let zkrácen na CMM (popsáno výše). Označování CMM stroje se stalo průmyslovým standardním termínem pro 3D měřicí stroje. První CMM zařízení bylo zřejmě od italské firmy DEA (Digital Electronic Automation), která předtím představila portálový rám jako CMM s pevnou sondou v roce 1950. Zhruba ve stejné době firma Ferranti Metrology ze Skotska představila svůj úhlový CMM s pevnými sondami. DEA tvrdí, že představil jejich CMM jen několik měsíců před Ferranti.

Je možné, že Ferranti pravděpodobně zavedlo první CMM s DCC v roce 1959 v Anglii, zatímco DEA tvrdí, že uvedla na trh první CNC CMM. Dalším kandidátem je americká firma Shelton Metrology, který postavil CMM se vzduchovým ložiskem v 60-tých letech. LK Tool, firma rovněž z Velké Británie již dlouho tvrdila, že vyrábí první mostový CMM, který se stal standardní konfigurací pro souřadnicové měřicí stroje v pozdějších letech.

Konzolové CMM, mostové CMM, portálové CMM, CMM horizontální ramena, portálové CMM, CMM posuvný stůl, pevné mostové CMM a CMM kloubová ramena se staly jdnotlivými konfiguracemi pro souřadnicové měřicí stroje.

Pokud vezmeme vznik jednotlivých společností chronologicky, pak dle [6] od úplného začátku tohoto odvětví (dle dostupných údaj by shrnutí vypadalo asi následovně (pro stručnost uveden rok vzniku, jméno společnosti a země vzniku):

1819 - Firma Kern & Co, Farau Švýcarsko. Je to jeden z předchůdců dnešního Leica Geosystems AG spolu s firmou, která vstoupila do života, asi 100 let později v Heerbrugg, Švýcarsko.

1833 - Společnost Brown & Sharpe, USA

1869 - Ernst Leitz, Wetzlar, Německo

1911 - CE Johansson, Eskilstuna, Švédsko

1919 - Wild Heerbrugg, Heerbrugg, Švýcarsko

1933 - Sheffield Gage Corporation, Dayton, USA

1945 - TESA SA, Švýcarsko

1963 - DEA, Itálie - ve stejném roce vychází Alpha - první souřadnicový měřící stroj na světě - Ferranti Metrology, Skotsko

1986 - ROMER SARL, Francie

1992 - Hexagon AB, Švédsko, Hexagon Metrology je součástí Hexagon Measurement Technologies, což je obchodní oblast Hexagon Group.

Další vývoj do současnosti byl zajišťován vzájemným kupováním, slučováním, spoluprácí jednotlivých společností. Sledování tohoto vývoje by bylo hodně časově náročné a samotné provedení by bylo nad rámec této práce.

Z výše uvedeného je vidět, že každá z vyspělých zemí světa si vytvořila svůj domácí CMM průmysl. Největší rozšíření CMM přišlo od firem z Velké Británie. Firma Ferranti Metrology začala s CMM průmyslem ve Velké Británii a po krátkém období dala licenci ke své technologii firmě Bendix, která byla jako zmocněnec za Ferranti CMM v USA. Bendix CMM se stala dominantním dodavatelem CMM se svým systémem Cordax v průběhu 60. a 70. let, později známým jako Sheffield.

Cordax CMM byl primárně úhlový ruční CMM s pevnými sondami. Když byla technologie dostupnější, tak pak systém přecházel na dotykové sondy od společnosti Renishaw. Sheffield Metrology je nyní součástí skupiny Hexagon Metrology.

2.1. Globální producenti

- **Velká Británie**
  - W & A metrology
  - Eley & Warren,
  - LK Tool,
  - Notsa,
  - Vickers Maxicheck,
  - IMS – International Metrology Systems

- **Itálie**
  - DEA
  - Poli
  - Coord3
  - Prima

Firma Prima Industries byla zaměřena na dílenské CMM a zástupci této firmy si jako jedni z prvních uvědomili flexibilní metrologii jako budoucnost měření v dílenské oblasti. Jak bylo uvedeno již výše, DEA je jednou z nejznámějších značek v této oblasti a jejich stroje lze nalézt ve většině zemí světa. Zde několik jejich produktů:

- DEA Omicron CMM
- DEA IOTA CMM
- DEA Epsilon CMM
- DEA Beta CMM
- DEA Delta CMM
- DEA Gamma CMM
- DEA Swift CMM

Firma DEA se proslavila největším portálovým souřadnicovým měřicím strojem, který byl kdy postaven.

- **Francie**
  - Nejznámější - Renault CMM
  - Romer CMM

- **Německo**
  - Leitz Metrology
  - Zeiss CMM
  - Wenzel
  - Mora
  - Steiffelmeyer

Poslední tři zmiňované firmy jsou všechny významné výrobou horizontálních CMM. Leitz a Weiss CMM produkují CMM vysoké přesnosti se skenovací sondou, ale většina ostatních výrobců využívá dotykové sondy Renishaw.

Několik produktů firmy Zeiss:

  - Zeiss Prismo Vast CMM
  - Zeiss WMM CMM
  - Zeiss UMC CMM
  - Zeiss UC CMM
  - Zeiss UPMC CMM
  - Zeiss Eclipse CMM
  - CONTURA CMM
  - Vista CMM
  - …
  - Horizontální ramena Zeiss
    - Zeiss Carmet CMM
    - Zeiss SMC CMM
    - Zeiss SMM CMM

- **Švýcarsko**

Zde se lze hlavně zmínit o firmě Metromec, která je dodavatelem metrologického software pro PC, který se stal populární u většiny výrobců CMM v polovině 80. let a CMM. Dnes je Metromec stoprocentní dceřinou společnosti Wenzel a je tradičním dodavatelem CAD software.

Další společnosti:

  - Tesa Vision - vyrábí stroje s označením Vision a širokou škálu metrologických nástrojů
  - Leica Geosystems - slavný pro laserové trackery a velkoprostorové skenery

- **Švédsko**

Pouze jeden dodavatel CMM - CE Johansson, známá též jako CEJ.

- **Španělsko**

Vstoupilo do CMM průmyslu teprve v posledních letech se společností Trimek CMM.

- **Spojené státy**

Mají své vlastní výrobní podniky produkující CMM. Například Starrett a Sheffield bylo dominantní jméno na trhu CMM se svým Apollo RS CMM, Cordax CMM, a Sheffield 1808. Novější systémy firmy Sheffield CMM jsou Discovery CMM a Endeavour CMM.

Mezi ostatní americké výrobce se řadí mimo jiné:

- Helmel
- Taurus, Elm Systems
- Resource engineering
- Starrett
- …a další

- **Japonsko**

Má několik výrobců souřadnicových měřicích strojů včetně největšího světového výrobce zařízení pro metrologii Mitutoyo, také známý jako MTI, který vyváží své výrobky na světový trh. Mitutoyo Bright CMM, Bright Apex CMM jsou asi nejprodávanější CMM na celém světě.

Některé další nejmenované a výše jmenované společnosti (např.: Brown & Sharpe, CE Johansson, CimCore, CogniTens, DEA, Leica Geosystems (Metrology Division), Leitz, M & H Inprocess Messtechnik, PC-DMIS, Quindos, ROMER, Sheffield, Standard Gage a TESA) jsou součástí skupiny Hexagon Metrology.

Jedná se o seskupení několika výrobců, kteří se společnými silami podílejí na vývoji a výrobě souřadnicových měřících strojů.

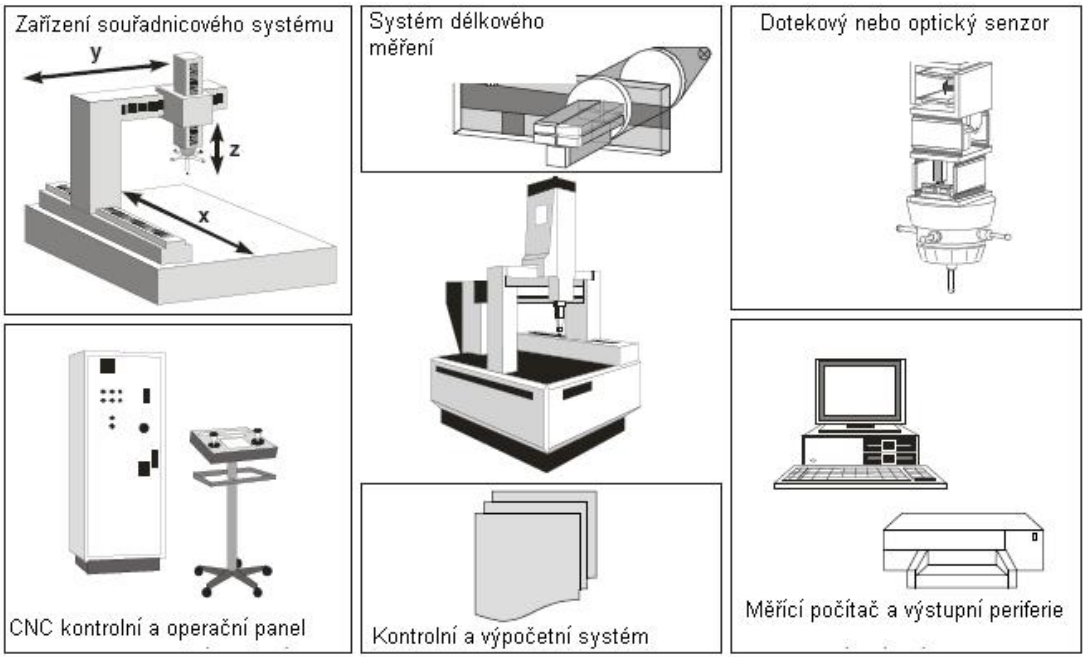
Jak je z předchozího uvedeného jasné, tak po celém světě existuje mnoho výrobců a vývojářů, proto orientace v kompletní nabídce je poměrně složitá. I když na každého jedince na světě svým způsobem dopadá ekonomická krize, přesto tyto společnosti neustále vyvíjí nové verze CMM, které byť se liší jen v detailech, tak tyto detaily umožňují další zvýšení použitelnosti těchto strojů a s tím související aplikovatelnosti a přesnosti.

3. Konstrukční uspořádání

Informace konstrukčního uspořádání budou vzhledem k principiální shodě vztaženy ke klasickým stacionárním souřadnicovým měřícím zařízením (CMM).

3.1. Části měřícího řetězce

Hlavními částmi měřícího řetězce je vlastní konstrukce stroje (zařízení souřadnicového systému), k této konstrukci je připevněna sonda s měřícím dotykem. Další částí je systém délkového měření, který spolupracuje jak se sondou, tak s kontrolním a operačním panelem, který je další částí. K řetězci pak dále patří potřebné počítačové SW a HW vybavení (Informace o SW a HW vybavení a jejich popis funkce a komunikace s ostatními zařízeními by vydaly na celou další samostatnou práci, proto nebudou dále rozebírány). Jednotlivé části měřícího řetězce jsou na následujícím obrázku. Na obrázku se nenachází příslušenství v podobě upínacích prvků.



Obr. 3 Měřící řetězec [2]

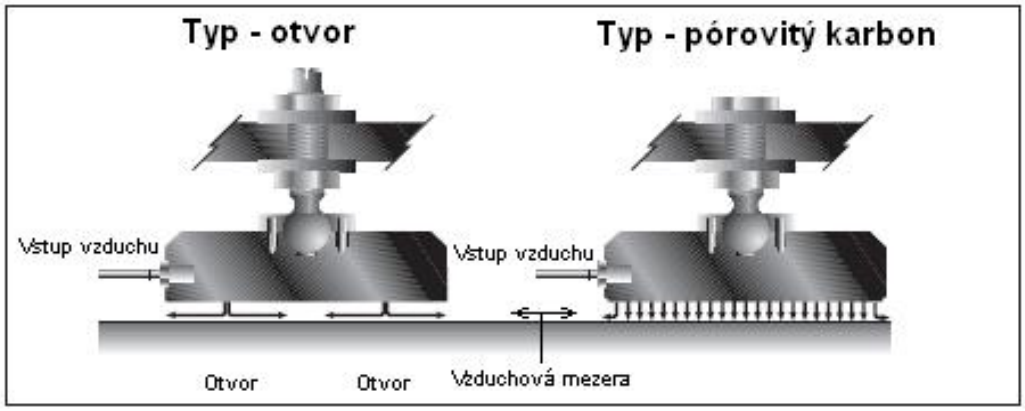
V dalším textu budou popsány hlavní části, jako je samotná konstrukce stroje a měřící sondy a jejich doteky.

3.2. Hlavní konstrukce CMM

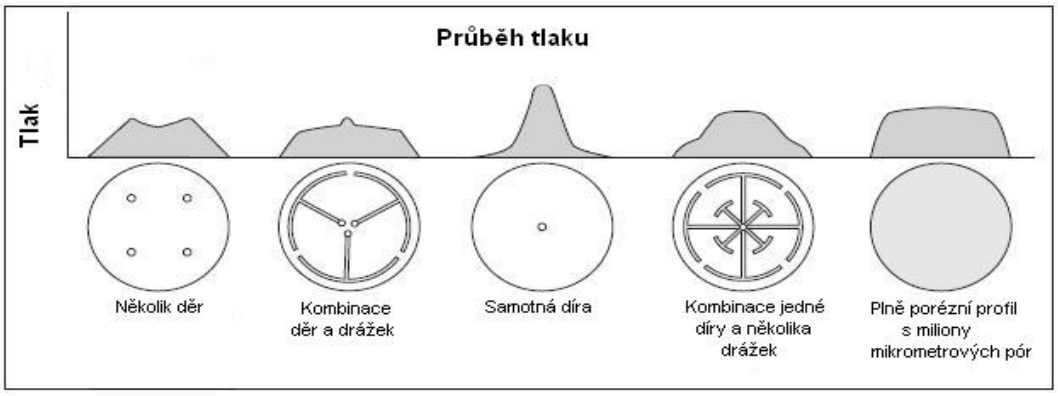
Hlavní typy konstrukcí používaných pro stavbu hlavní nosné části celé CMM jsou na následujícím obrázku. Dají se rozdělit na konstrukce „klasického typu“ (mostové, portálové, konzolové atd.) a na specializované (například speciálně pro měření ozubených kol atd.). Je jasné, že výběr typu konstrukce bude podléhat požadavkům na měření (kde a jak měření probíhá, rozměry měřených součástí, rozměry místa měření, požadovaná přesnost atd.).

Obr. 4 Typy konstrukcí [2]

Vlastní konstrukce umožňuje pohyb sondy ve třech základních směrech (vodorovně, příčně, svisle) dle os na obrázku č. 5. Každý stroj má svoje délková měřidla. Většinou se používá skleněných nebo keramických pravítek, kde jsou laserově vypáleny jednotlivé dílky délek (po 0,1 μm) a bývají na všech třech osách. Materiál je volen takový, aby byla co nejmenší tepelná roztažnost pro dosažení požadované přesnosti. Vodorovný, příčný i svislý pohyb pinoly je řízen servomotory a umožněn díky „vzduchovým polštářům – mezerám“ (ve vedení vzduchového ložiska – viz obr. 5). Existují různé typy ložisek a hlavním rozdílem je distribuce vzduchu do vzduchové mezery. U všech typů je požadován ideálně plochý průběh tlaku vzduchu na „dosedací“ ploše (viz obr. 6). Servomotory jsou digitálně ovládány se zpětnou vazbou. Vlastní pohyb je pak distribuován přes třecí převody - řemínek, což slouží zároveň jako ochrana při kolizi.



Obr. 5 Příklady vzduchových ložisek [8]



Obr. 6 Různé druhy průběhu tlaku
na dosedací ploše ložiska [8]

Tepelná stabilita

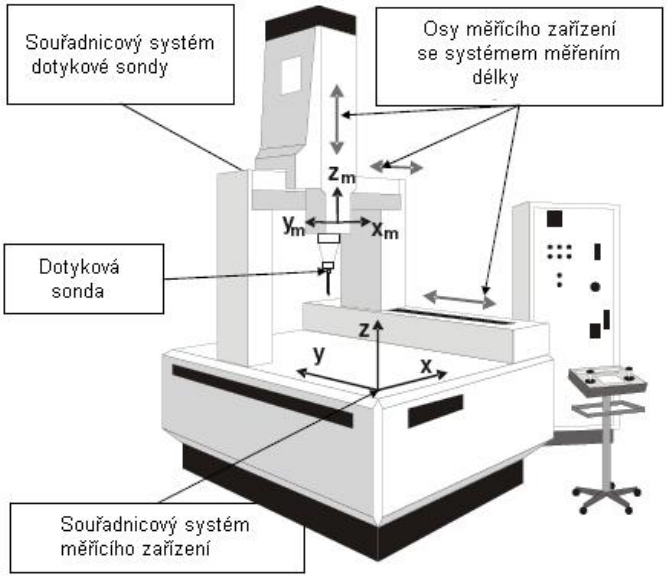
Z hlediska přesnosti měření je důležité, aby nedocházelo k přenosu tepla z motorů na vlastní nosnou konstrukci nebo další části měřícího řetězce a zabránilo se tak deformacím a nepřesnostem v měření vlivem tohoto tepla. Tepelná ochrana může být zajištěna několika způsoby. Hlavní požadavek je, aby měření probíhalo v klimatizované místnosti o teplotě 20°C ± 1°C, kde je malý teplotní spád max 1°C/hod a max. 1°C/1m výšky. Ovšem zde je nutné hodnotit také použití měřícího přístroje – jeho přesnost. V automobilkách při kontrolách karoserií je požadovaná přesnost ±30μm, tudíž není potřeba takových nároků na klimatizaci. V laboratorních podmínkách jsou naopak velké nároky na klimatizování místnosti.

Co se týká vlastního přenosu tepla z motoru na další části konstrukce, je zde několik řešení. Jedním řešením je umístění motorů do míst tak, aby vznikající teplo nepůsobilo na funkční části stroje. Pohon os je pak zajištěn pomocí několika převodů. Pokud je motor umístěn v malém prostoru, pak je tento prostor odvětráván. Pokud je potřeba, tak se k motoru umístí ventilátor. Dalším způsobem je chlazení vzduchem proudícím skrz vzduchová ložiska do vnitřního prostoru stroje (až 60 litrů vzduchu za minutu). Další možností je odstranění vlivu tepla sekundárně (primárně klimatizací) teplotních senzorů a následnými korekcemi pomocí SW. Dalším faktorem, který ovlivňuje teplotní stabilitu a tím přesnost měření, je také materiál vlastní konstrukce a dalších částí. Je evidentní, že bude rozdílná roztažnost v případě použití oceli, karbonu nebo přírodního kamene. Z tohoto pohledu se jako nejpříznivější jeví přírodní kámen, protože při jakékoliv změně teploty má tento materiál lineární roztažnost ve všech třech osách stejnou a tudíž nedochází ke krutu konstrukce. Zdroj [1], [3], [7].

Další součástí řetězce je sonda a k ní náležící měřící dotek. Vlastnímu měřícímu zařízení náleží „globální“ souřadnicový systém. V tomto systému je uložen vzorek se svým souřadnicovým systémem, který je proměřován. Propojovacím článkem mezi těmito dvěma prvky systému je sonda se svým vlastním souřadnicovým systémem (viz obrázek 5.). Řídící SW pak zajišťuje měření, vyhodnocování a interpretaci výsledků.

Rozdíl mezi stroji je hlavně v celkové velikosti rozsahu měření. Rozsah se může pohybovat od 505:405:405 mm do 2005:5005:2005 mm. Jedny z těch nejrozměrnějších mají rozsah 18000:3900:3500 mm (vzdálenosti jsou pro pohyb v osách X:Y:Z). Zdroj [1].

Dalším hodnotícím parametrem je délková odchylka měření - MPE_E (μm). U přístrojů s větším rozsahem měření je tato odchylka měření větší. Odchylka je uváděna ve tvaru například 1,7 + 0,3L/100, kde L je délka v milimetrech a může se pohybovat od dříve uvedené (pro stroje s rozsahem 505:405:405 mm) do 60 + 35L/1000 (pro stroje s rozsahem 18000:3900:3500 mm).



Obr. 7 Detail konstrukce [2]

3.3. Měřící sondy

Soustava sondy a jejího doteku dává základní informace během kontrolního měření. Během vývoje samotných CMM procházely vývojem i sondy s doteky. V současnosti se používá několik druhů sond. Hlavní rozdíly mezi nimi jsou v inicializaci záznamu (interakce doteku s měřeným vzorkem).

Používají se sondy na principu změny magnetické indukce, odporu nebo optickém principu (při interakci doteku s měřeným vzorkem dojde k vychýlení světelného nebo laserového paprsku v soustavě zrcadel, které zaznamenává optické čidlo a informaci o této změně předává dál). Mohou být též sondy tenzometrické. Celá tato skupina se řadí mezi ***spínací dotykové sondy***.

Dle [6] tyto sondy měří nespojité body a jsou ideální pro kontrolu trojrozměrných prizmatických dílů a známých geometrických tvarů. Dále jsou vhodné pro rozmanitou škálu aplikací, materiálů a povrchů.

Obr. 8 Tenzometrická spínací sonda [6]

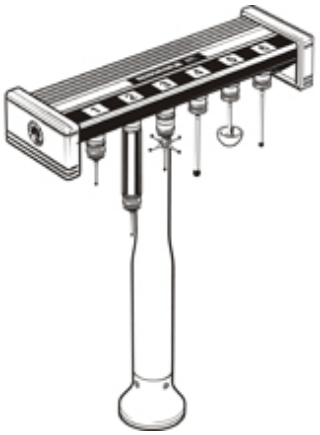
Další možností jsou ***skenovací sondy***. Dle [6] se jedná o miniaturní měřící stroje, které každou sekundu snímají stovky bodů povrchu a umožňují tak určení přesného tvaru, velikosti i polohy. Lze je také použít ke snímání nespojitých bodů. Rozdíl oproti předchozím spínacím sondám je jasný: Spínací dotekové sondy snímají nespojité body na povrchu tělesa, ale skenovací sondy sbírají velké množství dat z povrchu součásti a dávají tak lepší obraz o tvaru a rozměrech této součásti.

Způsob práce skenovací sondy je takový, že během činnosti poskytují nepřerušovaný výstup výchylek doteku. Ten může být použit k odvození tvaru povrchu.

Při skenování dochází ke kontaktu mezi dotekem sondy a měřeným dílcem. Sonda s dotekem je pak přesouvána tak, aby byl dotek v neustálém kontaktu s povrchem měřeného dílce. Během tohoto pohybu jsou snímána velká množství dat.

K získání co nejlepších výsledků je potřeba různých filtračních algoritmů k převodu dat. „Výhodou“ je změna rychlosti skenování dle typu povrchu. Pokud je plocha více zakřivena, tak skenování je pomalejší, ale naopak ke zrychlení skenování dojde u plochých rovin. V místech s rychlou proměnlivostí plochy je snímáno více dat. Standardní je 2000-6000 bodů za sekundu.

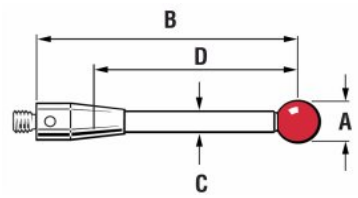
Zde je nutné připomenout i skutečnost využití zásobníků pro výměnu doteku a sondy, protože jediná konfigurace snímače a doteku není většinou postačující. Pokud se neprovádí stále měření jen jednoduchých součástí, pak je nutné měnit konfiguraci sondy a doteku. Upevnění se může provádět ručně pomocí závitového spoje, ale v tomto případě je po každé výměně nutná kalibrace. S výhodou se používají zásobníky pro automatickou výměnu celého modulu. Díky odstranění nutnosti nové kalibrace po výměně modulu dojde ke zvětšení flexibility stroje a výrazné úspoře času a zvýšení výkonu měření.



Obr. 9 Zásobník pro výměnu modulu sondy s dotekem [6]

3.4. Měřící doteky

Pravidla pro výběr doteku



A – Průměr kuličky
B – Celková délka
C – Průměr dříku
D – Efektivní činná délka

Obr. 10 Rozměry doteku [6]

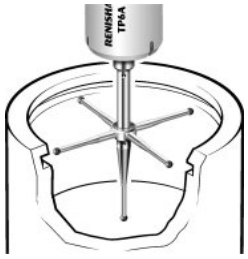
1. Pro co nejlepší a nejpřesnější výsledky měření by se měly používat co nejkratší doteky.
   - Důvod: Čím větší délka doteku tím více se může ohýbat a tím se snižuje přesnost měření.
2. Dále by se mělo používat co nejmenší počet spojů.
   - Důvod: Každý spoj doteku je potenciálním zdrojem deformace, a tudíž i chyby měření.
3. Průměr kuličky by se měl používat co největší.
   - Důvod: Čím větší je mezera mezi kuličkou a stopkou doteku, tím menší je možnost chybných sepnutí způsobených kolizí stopky s dílcem. Díky většímu průměru kuličky se musí zvýšit průměr stopky a tím se zvýší tuhost doteku.

Zdroj [6].

Existuje několik druhů doteků, lišících se dle konstrukce a vhodnosti pro dané aplikace. Jedná se zejména o doteky přímé, hvězdicové, bodové a další. Dále je uveden jejich přehled se stručným popisem.

Přímé doteky

Jsou vhodné pro většinu zkušebních aplikací. Na jejich konci je použita většinou průmyslově vyrobená rubínová kulička. Jedná se o tvrdý keramický materiál, proto je jeho opotřebení sníženo na minimum. Tyto kuličky mohou být namontovány na stopkách různých materiálů.



Obr. 11 Hvězdicový dotek [6]

Hvězdicové doteky

Mohou být použity pro kontrolu různých vlastností těles. Jsou vhodné zejména pro kontrolu vnitřních prvků těles jako vnitřní povrchy, nebo drážky uvnitř děr. Minimalizuje se tak potřeba pohybu kontrolovaného tělesa, ale každá část této „hvězdy“ vyžaduje nulování (stanovení výchozí pozice), jako kdyby byly samostatné. Na každém „cípu“ hvězdy se rovněž nachází kulička.

Používané materiály kuliček

- **Rubín** – velmi tvrdý a odolný proti opotřebení, nejčastěji používaný
- **Nitrid křemíku** – používá se při skenování hliníku, protože oproti rubínu lépe odolává „adheznímu otěru“
- **Oxid zirkoničitý** – použití při skenování šedé litiny (odolnost proti otěru)

Obr. 12 Dutý dotek [6]

Používané materiály stopek

- **Ocel** – použití nemagnetické ocelové stopky u většiny doteků s průměrem 2-30 mm (nejběžněji používaný materiál)
- **Karbid wolframu** – pro průměr kuličky menší než 1mm nebo hrot delší než 50 mm
- **Keramika** - pro průměr kuličky větší než 3mm nebo hrot delší než 30 mm, tuhost stejná jako ocel, ale nižší hmotnost

Měřící doteky – pokračování

Bodové doteky

Jsou vhodné pro měření závitů, konkrétních bodů a další podobné aplikace. Nejsou vhodné pro použití na obráběcích strojích.

Doteky s dutou kulovou plochou

Jsou ideální pro měření a kontrolu hlubokých prvků a děr ve všech třech směrech (X, Y, Z). Díky velkému poloměru doteku se minimalizuje vliv drsnosti povrchu, který je průměrován.

Válcové doteky

Jsou vhodné pro kontrolu otvorů u materiálů menších tlouštěk, pro kontrolu různých závitových prvků a dalších. Kuličkové ukončení umožňuje kontrolu ve všech třech směrech.

Diskové doteky

Používají se pro kontrolu různých zářezů a drážek. Způsob měření je podobný měření s dotekem o velkém průměru, ale je využita pouze malá část povrchu možná pro kontakt. Z tohoto důvodu je důležité zajištění správného kontaktu povrchu a disku.

3.5. Řídící systém

Jednotlivé části a popis funkce by se dal ve zkratce popsat asi takto: Motory jsou řízeny řídícím kontrolérem, který dostává signály od vyhodnocovacího PC přes komunikační porty. Odměřování souřadnic jednotlivých os je také zpracováno v kontroléru. Signál od sondy je zpracováván pomocí interface a opět přes rozhraní posílá data do PC. Širší popis zde pro zjednodušenou představu není uveden.

Zdroj [7].

Obr. 13 Diskový dotek [6]

3.6. Příslušenství

Do příslušenství se řadí hlavně upínací prvky a k tomu potřebné nářadí. Díky těmto prvkům je měřený objekt upevněn do požadované polohy. Každý výrobce (např. Mitutoyo, Schut, DeMeet) má katalog se sety kde jsou uvedeny počty jednotlivých prvků v setu a snaží se vyrábět tak, aby byly použitelné na všech měřících strojích.

Do upínacích prvků se řadí upevňovací desky nebo profilové tyče, spojovací komponenty, poziční komponenty a fixační komponenty. Jako materiál se může používat hliníková slitina (AlMgSi1) s černým nebo stříbrným anodizovaným povrchem. Černě anodizovaný povrch zabraňuje odrazu světla a stříbrný je využíván tam, kde světelný reflex je požadován.

U uvedených výrobců zmiňme některé jejich systémy:

- Mitutoyo - Komeg ECO-FIX, Repro Fix, Quick Rail
- Schut – DF Systém

4. Oblasti použití

Využití CMM v průmyslu

Pokud s nadsázkou řekneme, že při současném stavu jsou přístroje „schopny změřit cokoliv“, lze je nalézt v mnoha oblastech, které se mohou svou povahou zdát naprosto odlišné. CMM můžeme nalézt v takových odvětvích jako je letecký nebo automobilní průmysl, oblast medicíny, přesného strojírenství nebo vědy. Hlavní oblasti použití s výpisem těch zajímavějších jsou uvedeny dále.

Letecký průmysl

Airbus – St. Eloi, Toulouse, Broughton
- Kontrola zařízení, kterým je ukotven motor letadla ke křídlu
- Kontrola a proměřování jednotlivých komponentů křídel
- Podpora při vývoji a kontrole Airbusu A380

NASA – Marshall/Huntsville, Goddard/Greenbelt
- Podpora vesmírných programů na Měsíci a na Marsu,
- Hubbleův teleskop

BAE systems – Samlesbury
Eurocopter – Donauwoerth
…a další

Obr. 14 Použití CMM ve firmě BMW [5]

Automobilový průmysl

Italdesign Giugiaro – Torino
- Vývoj, schvalování, uvádění do provozu nových designových prvků a automobilových studií.

Škoda – Mladá Boleslav
- Kompletní kontrola vozidel jako celku (venkovní design – tvar a rozměry kapoty), tak jeho jednotlivých částí (části motorů, prvky podvozků, kontrola interiérových prvků)

Daimler Chrysler – Bremen, Dusseldorf
BMW Leipzig
Opel Russelsheim

Těžký průmysl

Caterpillar – Peoria
- Podpora při vývoji a výrobě buldozeru a rypadel jak v oblasti čistě softwarové tak i v oblasti prvních prototypů a modelů.

Meccanica Ponte Chiese – Brescia
- Výroba pracovních, výrobních a přepravních robotů.

ST Kinetics – Singapur
- Výroba a kontrola armádních strojů.

AfM Technology
- Kontrola průběhu výroby talířového kola s průměrem 12,7 metru.

Přesné strojírenství

Teleskopy – VLT (Very Large Telescope)

- Použití CMM technologií při výrobě, sestavení a kontrole teleskopů pro pořizování co nejostřejších snímků a zachycení světla ze vzdálených oblastí vesmíru.

Kaeser Kompressoren – Gera

- Kontrola a využití při výrobě jednotlivých částí kompresorů

Keller – Nurthingen

- Výroba vačkových a klikových hřídelí

Železnice

Zaigler Machinenbau – Kulmbach

- Obrábění velmi velkých komponent pro „železniční průmysl“ v malých množstvích

Vzdělávání a věda

Duebendorf Aviation Museum

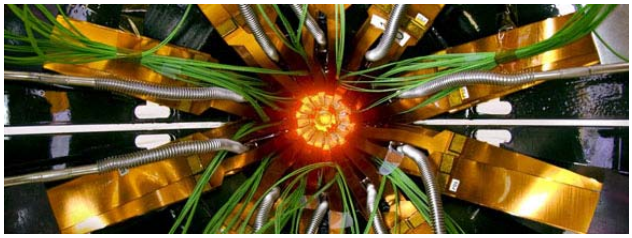
- Převod skutečných letadel do digitální podoby.

CERN – Ženeva

- Měření součástí a jejich kontrola u největšího urychlovače světa.

ATR – Colonella

- Výroba motorek, Hi-Tech bicyklů



Obr. 15 Obrázek urychlovače (CERN) [5]

Výroba lodí

Chantiers de l'Atlantique - Saint-Nazaire

Thyssen Nordseewerke – Emden

…a další

Domácí aplikace

Hansgrohe - Schiltach

- Kontrola rozměrů koupelnových prvků (vodovodních trubek, sprch, mixerů vody)

Výroba elektřiny

Alstom – Birr

NOI-Rotortechnik – Nordhausen

- 3-dimezionalní meření a analýza rotorových lopatek u turbín

TVL Van Landuyt NV – Wetteren

- Kontrola součástí větrných elektráren

Zdroj [5]

Obr. 16 Použití CMM ve firmě Alstom [5]

5. Současné trendy v oblasti CMM

Dle dostupných informací lze jako velký pokrok vyzdvihnout technologii tří- a pětiosého skenování.

5.1. Tříosé skenování

Dle [6] tříosé kontaktní skenování nabízí výrazné výhody, co se týká rychlosti, oproti měření pomocí dotekového spínače. Využívá se přitom sondy, která spojuje dvě sondy v jednu. Je zde spojena technologie vysoce přesné skenovací sondy a spínací dotekové sondy pro zvýšení flexibility.

Jak bylo uvedeno výše, měření skenováním funguje tak, že se neustále zaznamenávají data, když dotek provádí skenování při kontaktu s povrchem měření (snímáno 2000 – 6000 bodů za sekundu). Veškerý pohyb zajišťují osy X, Y a Z stroje.

Tento typ systému je vhodný v případech, kdy jsou k definování tvaru a rozměrů (formy) prvku velké objemy dat, ale výkon není hlavní priorita. Příkladem může být odebírání vzorků listů vrtulí, profilů aerodynamických ploch nebo vrtání válců automobilů (v těchto případech neposkytuje několik dotekových bodů dostatek informací k přesnému měření formy).

Jako příklad uveďme tříosé skenovací sondy SP25M nebo SP80. Druhá zmiňovaná dokáže nést doteky až 800 mm dlouhé.

Obr. 17 Kalibrace [6]

5.2. Pětiosé měření

Dle [6] je toto měření prováděno pomocí technologie Renscan5^{TM}. Jedná se o revoluční technologii souřadnicových měřících strojů, která nabízí bezkonkurenční rychlost a přesnost. Dochází až k 50ti násobnému zvýšení výkonu stroje. Díky této technologii se provádí standardní měřící a kontrolní operace, které provádí běžné systémy se spínacími doteky nebo tříosými skenovacími sondami, ale dochází k výrazné úspoře času, která může být uživatelem jinak využita.

Výrazným pokrokem je úspora seřizovacího času, protože hlavice Renscan5^{TM} potřebují pouze jednu kalibrační operaci po dobu 20ti minut, pro dosažení přesné polohy ve všech úhlech nekonečného otáčení. Tím se nahradí konvenční vícenásobný kalibrační postup, který může trvat několik hodin.

Obr. 18 Rychlé skenování [6]

Výborná je vlastnost, kdy je požadavek pouze na několik jednoduchých dotekových bodů. Tyto body jsou pak díky této nové technologii snímány „za letu“ při velmi vysoké rychlosti. Pro řadu bodů okolo díry (vývrtu), se osy hlavice otočí do požadované polohy a poté dojde k vysunutí doteku a sejmutí dotekových bodů.

Pětiosé skenování je výhodné zejména ve vztahu k součástem modelovaným v CAD systémech. Projektanti mají mnohem větší volnost ve vytváření složitých součástí. Kontrola těchto součástí pomocí spínacích dotekových sond nebo tříosého skenování by pak trvala příliš dlouho. Pro tento případ je využití pětiosé technologie ideální, díky schopnosti shromažďovat velké

množství dat.

Dle toho co již bylo uvedeno výše, dalo by se pětiosé skenování nazvat „dotekovým snímaním“. Dotekový snímač je připevněn k dvouosé servomotorické polohovací hlavici, která se může orientovat do nekonečných úhlů. Držák doteku z uhlíkových vláken je dutý a umožňuje „odpálení“ laserového paprsku jeho středem do reflektoru, který je hned za špičkou doteku. Odražený paprsek se vrátí do držáku hrotu a zaostří se na detektor citlivý na umístění v servomotorické hlavici. Když se špička doteku dostane do kontaktu s povrchem, držák doteku se mírně ohne, což způsobí, že laserový paprsek se přesune na detektor. Systém pak nastaví všech 5 os (3 osy stroje a 2 osy otočné hlavice) k zachování konstantního vychýlení 110 μm.

Obr. 19 Snímání [6]

5.3. Firemní nabídka

Mitutoyo

Většina firem někdy pořizuje výše zmíněné technologie od firmy Renishaw. Japonská firma Mitutoyo je jedna z nich. Uveďme několik nových výrobků tohoto výrobce CMM.

Crysta Plus M
- Integrovaná teplotní kompenzace přístroje od 16 do 26°C
- Osvětlení pracovního prostoru přímo z osy Z pro zjednodušené polohování
- Samoregulovatelná ložiska na všech osách
- Vysoká přesnost, skleněná pravítka na všech osách s protiprachovou ochranou
- Max rozsah měření: 700:1000:600 (X:Y:Z)

Crysta Apex C
- Přesná, proti prachu chráněná skleněná pravítka na všech osách
- Integrovaná teplotní kompenzace v rozsahu 16 - 26°C
- Vysoká přejezdová rychlost do 520mm/s
- Plně digitální servořízení pro pohyb stroje bez přenosu vibrací
- Rozsah měření od 505:405:405 do 2005:5005:2005 (X:Y:Z)

Euro-C STRATO
- Integrovaný aktivní vzduchový podstavec
- Integrovaná teplotní kompenzace přístroje v rozsahu 18-22°C
- Přejezdová rychlost 430mm/s
- Přesná a proti prachu chráněná skleněná pravítka na všech osách
- Samoregulovatelná vzduchová ložiska na všech osách
- Rozsah měření od 705:705:605 do 1605:4005:1505 (X:Y:Z)

LEGEX
- Nejvyšší přesnost pro měrovou laboratoř
- Pevná konstrukce portálu s pohybem stolu
- Integrovaný vzduchový podstavec
- Velká geometrická a kinematická přesnost
- Teplotní kompenzace 18-22°C

- Samoregulovatelná vzduchová ložiska
- Rozsah měření od 300:200:200 do 1210:1210:810 (X:Y:Z)

Tento stroj je vybaven systémem Micro Air Server. Jedná se o jednotku pro úpravu vzduchu. Slouží k filtraci, vysušení a stabilizaci teploty vzduchu na 20°C ± 0,1°C pro vzduchová ložiska a tím zajištění maximální přesnosti stroje.

CARBapex (CARBstrato)
- Měřící systém Single nebo Dualarm, kde jsou oba systémy řízeny synchronně
- Velmi přesná technika pro prostorovou kompenzaci
- Podpora mnoha snímacích systémů (spánací sondy, skenovací sondy, laserové doteky, kamerové systémy)
- Kontrola kolize pomocí světelné závory
- Rozsah měření 6000:1600:2400 (X:Y:Z)
- Přejezdová rychlost max 866mm/s

Zdroj [1].

Je zde nutné také uvézt již dříve zmíněné upínací systémy. Od společnosti Mitutoyo je na trhu systém REPRO-FIX, který zajišťuje hospodárnost, přesnost a úsporu času.

Dalším prvkem je nutný potřebný SW. Firma Mitutoyo nabízí SW s názvem MCOSMOS. Jedná se o kompletní SW balíček, díky kterému se dobře vyhodnocují výsledky měření, zdokumentují se a odprezentují se. Dochází také k archivaci dat.

Mezi hlavní znaky patří:

- Part Manager – příkazová centrála, kterou bude spuštěn SW balíček a měřící programy
- GEOPAK – geometrický modul pro vytvoření měřících programů pro měření geometrických elementů
- CAT 1000 P – modul pro On-Offline programování, pro vytvoření měřících programů s podporou CAD modelu
- CAD 1000 S – vyhodnocovací modul pro 3D volné tvary, pro porovnávání jmenovitých a skutečných dat CAD modelu a naměřených bodů
- SCANPAK – modul pro vyhodnocení 2D kontury

6. Závěr

Jak lze vysledovat z úvodní kapitoly, mají souřadnicové měřící stroje velice mnoho použití. Hranice se liší dle různých kritérií, jako je například místo použití, jestli se jedná o laboratoř nebo výrobní linku. Tento stroj může být řízen ručním ovládáním nebo počítačově. Pomocí těchto strojů lze měřit rozměry například pístního čepu a třeba i celého automobilu.

Jak ukazuje shrnutí historie těchto přístrojů, tak může existovat hodně názorů a domněnek o to, kdo sestrojil první stroj tohoto typu. Možností, kdo byl „první“, může být hodně, ale vývoj se již popřít nedá. Vývoj tohoto odvětví se odvíjel paralelně s vývojem odvětví ostatních. V současnosti, kdy je rozvoj techniky nepředstavitelný bez využití informačních technologií, nelze opomenout i oblast měření a kontroly. Tyto stroje v součinnosti s mikroprocesory počítače nabízejí několikanásobný výkon oproti strojům jen o nkolik let starším. Při zastavením se nad jednotlivými částmi měřícího řetězce je doslova jasné, že koordinace a spolupráce se neobejde bez využití počítačů. Nelze se pak divit, že tyto stroje nalezneme v rozdílných oblastech výroby a vývoje, jako třeba automobilovém, leteckém, železničním průmyslu, ale také ve vědecké oblasti nebo těžkém průmyslu.

Toho se týkají i trendy současnosti v tomto odvětví. Jak je uvedeno v textu, vývojem došlo až k padesátinásobnému zrychlení měření a snížení času potřebného pro kalibraci z několika hodin na několik desítek minut. Jedná se o velký krok dopředu, ale jistě se nejedná o krok poslední, neboť vývoj se dá těžko zastavit.

7. Seznam použitých zdrojů

[1] *Mitutoyo Česko s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2010-03-15]. Dostupný z WWW: <www.mitutoyo-czech.cz>.

[2] *Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen* [online]. 2009 [cit. 2010-03-15]. Dostupný z WWW: < www.wzl.rwth-aachen.de>.

[3] *Metrotest s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2010-03-18]. Dostupný z WWW:
< www.metrotest.cz>.

[4] *CMM Metrology.* [online]. 2002 [cit. 2010-03-18]. Dostupný z WWW:
< www.cmmmetrology.co.uk>.

[5] *Hexagon Metrology.* [online]. 2010 [cit. 2010-03-20]. Dostupný z WWW:
< www.hexagonmetrology.com>.

[6] *Renishaw apply inovation.* [online]. 2010 [cit. 2010-03-29]. Dostupný z WWW:
< www.renishaw.cz >.

[7] *BRT servis – Acuracy is our business.* [online]. 2010 [cit. 2010-03-29]. Dostupný z WWW: < http://www.brtservis.cz/>.

[8] NEW AIR BEARINGS - *Air bearings take off.* [online]. 2010 [cit. 2010-05-16]. Dostupný z WWW:
<http://www.newwayairbearings.com/adx/aspx/adxGetMedia.aspx?DocID=456,30,6,1,Documents&MediaID=1861&Filename=104358pdfpdf_00000008438.pdf >.

8. Seznam použitých zkratek

Zkratka/Symbol	Popis
CMM	Coordinate Measuring Machine (Souřadnicový měřící stroj)
DCC	Direct Computer Control (Přímá počítačová kontrola)
SW	Software

9. Seznam obrázků

Obr. 1 CMM od fy Mitutoyo 8

Obr. 2 Princip měření pomocí CMM 9

Obr. 3 Měřící řetězec 15

Obr. 4 Typy konstrukcí 16

Obr. 5 Příklady vzduchových ložisek 16

Obr. 6 Různé druhy průběhu tlaku na dosedací ploše ložiska 17

Obr. 7 Detail konstrukce 18

Obr. 8 Tenzometrická spínací sonda 18

Obr. 9 Zásobník pro výměnu modulu sondy s dotekem 19

Obr. 10 Rozměry doteku 19

Obr. 11 Hvězdicový dotek 20

Obr. 12 Dutý dotek 20

Obr. 13 Diskový dotek 21

Obr. 14 Použití CMM ve firmě BMW 22

Obr. 15 Obrázek urychlovače (CERN) 23

Obr. 16 Použití CMM ve firmě Alstom 23

Obr. 17 Kalibrace 24

Obr. 18 Rychlé skenování 24

Obr. 19 Snímání 25