

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Vít Zelený, CSc.

**Cesta ke zvýšení přesnosti měření délek pomocí kinematických modelů
měřicích zařízení**

**The ways of increasing length measurement accuracy using kinematical
model of measurements devices**

Summary

The topic of this habilitation lecture is to describe suitable approaches to modeling length measurement devices, aiming at finding their optimal measuring characteristics. A modeling phase occurred practically in every international project carried out recently whose goal was to design a new measuring device, rotary measuring table or a measuring gauge. Partial geometric errors were entered in the kinematical model, systematically or randomly (using a random number or the Monte Carlo method). Their interaction was determined and the resulting maximum error was sought. The entire model is based on the mathematical model of measuring strings using transformation matrixes. The goal is to minimize the total measuring error.

This is how the modeling of the SIP coordinate measuring machine was carried out in the Laboratory of Fundamental Metrology in the Czech Metrology Institute in Prague; then a model of a rotary table was created, a model of a self-centering head and finally a model of a coordinate machine for an area little discovered yet - the measurement accuracy in lower than 1 micrometer and goes down to hundreds to tens of nanometers, i.e. we are dealing with nanotechnologies. The kinematical model contains all estimated geometrical errors and uneven measurement uncertainty of particular sensors of the machine. The goal of the model, together with the mathematical calculation, is to predict the measurement accuracy. In the last case, it is the development of a coordinate Measuring Machine for nanotechnology components (Coordinate Measuring Machine - Nano CMM).

Souhrn

Tématem habilitační přednášky je popis vhodných přístupů modelování měřicích délkových zařízení s cílem najít jejich optimální měřicí vlastnosti. Prakticky ve všech mezinárodních projektech posledních let, ve kterých bylo cílem navrhnout nový měřicí stroj, otočný měřicí stůl, měřicí sondu se vždy uplatnila fáze modelování. Do kinematického modelu se vložily dílčí geometrické chyby, buď systematicky nebo náhodně, (pomocí náhodného čísla nebo metodou Monte Carlo). Zjišťovala se jejich interakce a hledala se výsledná maximální chyba. Celý model je založen na kinematickém modelu měřicích řetězců pomocí transformačních matic. Cílem je minimalizace celkové chyby měření.

Tímto způsobem se provedlo modelování souřadnicového měřicího stroje SIP v Laboratoři primární metrologie ČMI v Praze, model otočného stolu, vytvořil se model samocentrovatelné hlavy a jako poslední model souřadnicového stroje pro dosud málo známou oblast, kdy přesnost měření je nižší než jeden mikrometr a jde až do stovek až desítek nanometrů, tedy do oblasti nanotechnologií. Kinematický model obsahuje odhadnuté geometrické chyby a uvažování nerovnoměrné nejistoty měření jednotlivých čidel stroje. Cílem modelu společně s matematickým výpočtem je predikce přesnosti měření. V posledním případě jde o vývoj souřadnicového měřicího stroje pro komponenty nanotechnologií (Coordinate Measuring Machine - Nano CMM).

Klíčová slova: optický, dotykový, multisenzorový souřadnicový měřicí stroj, submikrometrová přesnost měření, kinematický a matematický model, nanotechnologie

Keywords: optical, tactile, multisensor coordinate measuring machine, submicrometer accuracy of measurement, kinematical and mathematical model, nano technologie

České vysoké učení technické v Praze

Název: Cesta ke zvýšení přesnosti délek pomocí kinematických modelů měřicích zařízení

Autor: Ing. Vít Zelený, CSc.

Počet stran: 16

Náklad: 170 výtisků

© Vít Zelený, 2007

ISBN

Obsah

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Obsah	5
1. Úvod	6
2. Ukázka metod a modelů měřicích strojů evropských měrových ústavů	6
3. Modelování měřicích zařízení	7
4. Zdroje chyb, geometrické chyby	9
5. Matematický popis	9
6. Příklady modelů	10
7. Měřicí stroj pro měření dílů nanotechnologií	11
7.1 Kinematický a matematický model	12
7.2 Virtuální měřicí stroj pro modelování měření	16
8. Závěr	18
Literatura	19
Odborný životopis – Ing. Vít Zelený, CSc.	20

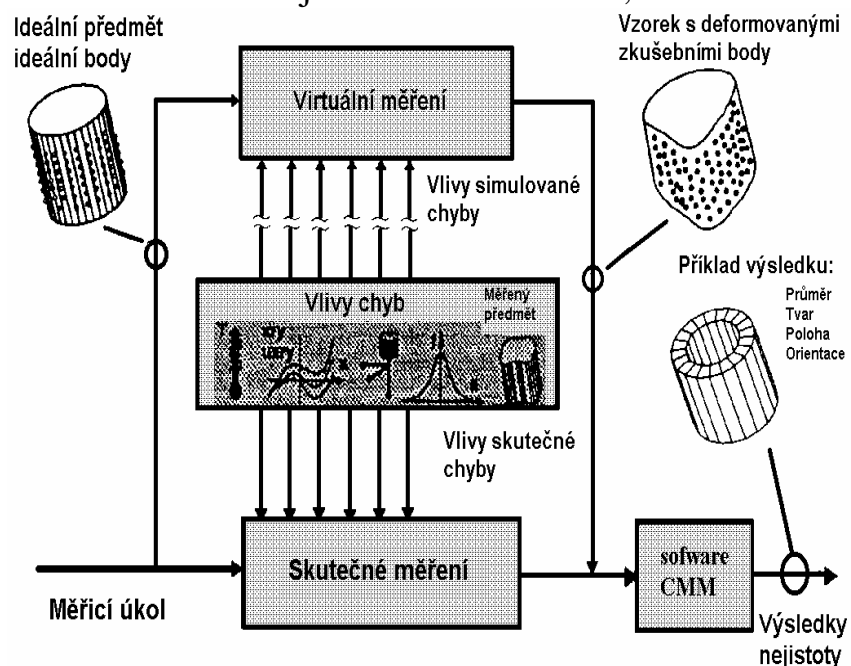
1. Úvod

K měření rozměrů, vzdálenosti, úhlu, přímosti, kolmosti a dalších parametrů strojírenských součástí používáme často souřadnicové měřicí stroje buď s dotykovým, optickým, nebo multisenzorovým snímáním měřeného bodu, hrany, roviny atd. Tyto stroje v sobě nesou název souřadnicový. Jejich konstrukce je uzpůsobena tak, že stroj vykonává dílčí pohyby v osách buď Kartézského, válcového nebo sférického souřadnicového systému. Obdobně pracují i mikroskopy, profilprojektory a další měřicí přístroje. Nejenom hlavní části měřicích strojů vykonávají pohyby, ale i konstrukční podskupiny vykonávají pohyby, která jim dovoluje jejich konstrukce. Tak např. měřicí sonda souřadnicového měřicího stroje SIP je navržena jako prostorový paralelogram, některé stroje jsou vybaveny otočným stolem, prsty samocentrovatelné sondy vykonávají buď posuvný nebo otáčivý pohyb. Všechny tyto konstrukce lze nejdříve zjednodušit kinematickým modelem a následně modelem matematickým. Protože všechny tyto popsané pohyby nejsou ideálními přímočarými posuvy nebo ideálními otáčivými pohyby, ale jsou zatížené chybami, zavedli jsme pojem geometrické chyby a ty přidáváme do modelu.

2. Ukázka metod a modelů měřicích strojů evropských měrových ústavů

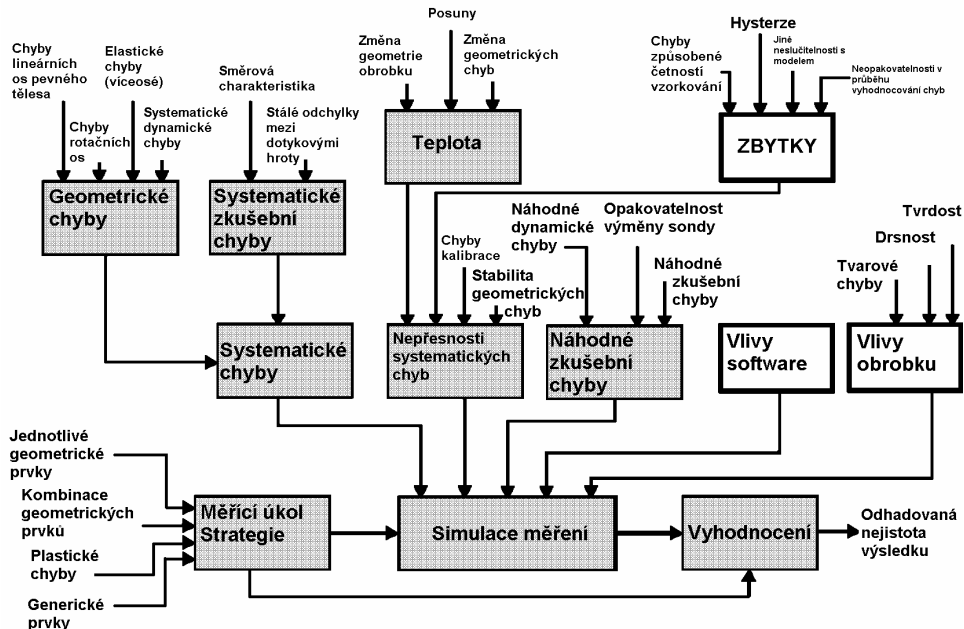
Na měřicí stroje, přístroje, měřicí hlavy a další díly se zaměříme s cílem najít zdroj chyb, které způsobují snížení nejlepších měřicích vlastností, snížení přesnosti, opakovatelnosti, stability. Takový rozbor byl pro souřadnicové měřicí stroje proveden např. v PTB (Physikalish Technische Bundesanstalt, SRN).

Schéma virtuálního souřadnicového měřicího stroje, tak jak bylo vytvořeno v PTB, je naznačeno na následujících dvou obrázcích, Obr. 1 a Obr. 2.



Obr. 1 Model virtuálního měřicího stroje

Jak v PTB [4],[5],[6] tak v italském národním metrologickém institutu [7] se zavedly geometrické chyby, jako význačná složka systematických chyb. Tyto systematické chyby spolu s chybami náhodnými vstupují do procesu měření a vyhodnocení.



Obr. 2 Geometrické chyby tvoří dominantní část systematických chyb

Důležitou součástí predikce výsledku je model. Vzájemná kombinace vstupních dat (v PTB používaná metoda Monte Carlo) [5], dává rozdílné výsledky, přičemž jedním z cílů je určení extrému, tj. největší chyby, spolu s pravděpodobností, se kterou tento jev může nastat.

3. Modelování měřicích zařízení

Každému měřicímu stroji, každé sondě bude v této práci nejdříve přiřazeno jednoduché schéma, k němu se vytvoří matematický model a do něj se vloží buď experimentálně zjištěná nebo odhadnutá data. Na následujícím obrázku je jednak souřadnicový měřicí stroj s výsuvným horizontálním ramenem a jeho zjednodušení.



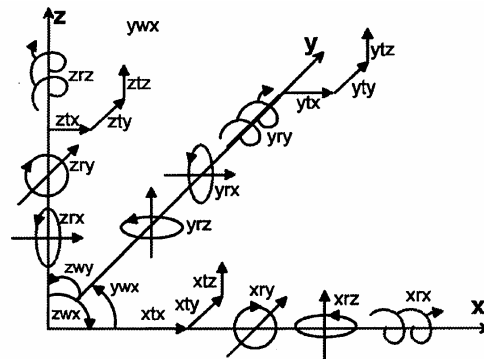
Obr. 3 Souřadnicový stroj s výsuvným horizontálním ramenem a jeho kinematický model

Na dílčí pohyb souřadnicového měřicího stroje v ose (např. lineární pohyb saní ve vedení) je v práci nahlíženo jako na pohyb v ose, ale se šesti přidavnými pohyby (6 stupni volnosti). Ty jsou omezeny vazbami. Reálná vazba stroje bude zkoumána s cílem najít při přesunu dílčí větve tělesa z jedné polohy do druhé sice malé, ale existující odchylky dx , dy , dz , $d\phi$, $d\psi$, $d\theta$ v závislosti na jedné ose např. x . Pro typ těchto strojů byl takto vytvořen model a definovaly se všechny chyby, které se podílejí na chybě celkové, Obr. 4. Je tedy třeba experimentálně zjistit funkční nebo polynomické závislosti všech 6 dílčích „malých přidavných“ pohybů, kterými jsou:

- průběh dx v závislosti na x
- průběh dy v závislosti na x
- průběh dz v závislosti na x
- průběh $d\phi$ v závislosti na x
- průběh $d\psi$ v závislosti na x
- průběh $d\theta$ v závislosti na x

a dále obdobně

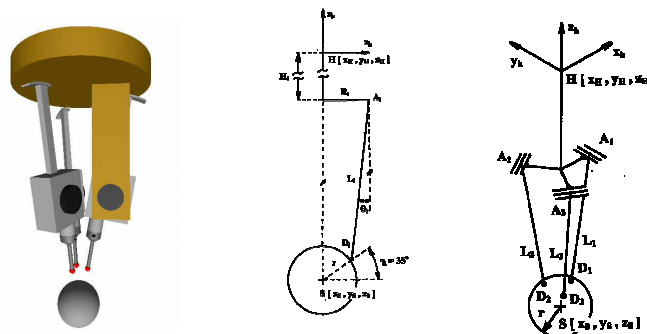
- průběh dx v závislosti na y
- průběh dy v závislosti na y atd.



Obr. 4 Definování všech chyb u souřadnicového měřicího stroje

V jedné ose sledujeme tedy 6 chyb, což je pro 3 kolmé osy celkem 18 chyb. Všechny těchto 18 chyb jsou vlastně funkce závislé na některé souřadnici. K nim přistupují i tři chyby kolmosti. Jsou to odchylky od pravého úhlu základních tří translačních pohybů. Tyto chyby definujeme jako konstanty.

Při vytváření modelu, např. samocentrovatelné sondy, kde základním pohybem není posuvný, ale otáčivý pohyb, se postupuje stejně, Obr. 5. Pod obrázkem je



Obr. 5 Model samocentrovatelné hlavy a jeho kinematické schéma matematický popis – sekvence transformačních matic podle [1] jednak bez chyb a potom s geometrickými chybami.

Porovnání ideálního (3.1) a reálného (3.2) řetězce s chybami

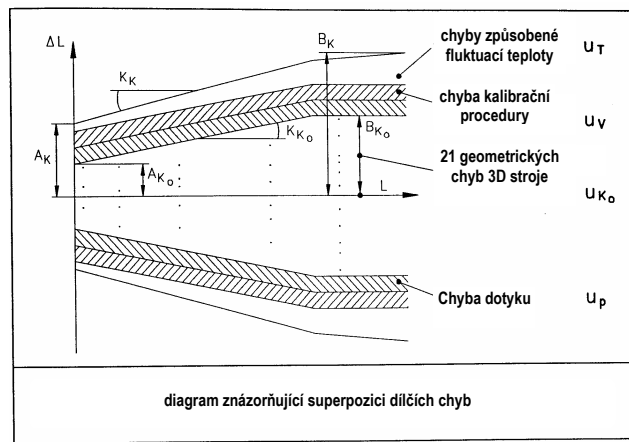
$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_x(x_H) \mathbf{T}_y(y_H) \mathbf{T}_z(z_H-H_i) \mathbf{T}_{\phi z}(\beta_i) \mathbf{T}_x(R_i) \mathbf{T}_{\phi y}(\theta_{0i}) \mathbf{T}_z(Vd_i) \mathbf{T}_x(Hd_i) \mathbf{T}_{\phi y}(\theta_i - \theta_{0i}) \mathbf{T}_z(-L_i) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_x(x_H) \mathbf{T}_y(y_H) \mathbf{T}_z(z_H-H_i) \mathbf{T}_{\phi z}(\beta_i + \Delta\beta_i) \mathbf{T}_x(R_i + \Delta R_i) \mathbf{T}_{\phi z}(\Delta\delta_i) \mathbf{T}_{\phi x}(\Delta\epsilon_i) \mathbf{T}_y(\Delta E_i) \mathbf{T}_{\phi y}(\theta_{0i}) \mathbf{T}_z(Vd_i) \mathbf{T}_x(Hd_i) \mathbf{T}_{\phi y}(\theta_i + \Delta\theta_i - \theta_{0i}) \mathbf{T}_z(-L_i - \Delta L_i) \quad (3.2)$$

Základním krokem modelu je přiřazení chybových pohybů, které byly nazvány geometrickými chybami a pak následují výpočty s kombinacemi hodnot [12].

4. Zdroje chyb, geometrické chyby

Na výsledné chybě se podílejí i další chyby. Souřadnicové stroje byly podrobeny analýze, a zjišťoval se vliv všech důležitých faktorů na přesnost délkových měření, Z grafu, který je výsledkem této analýzy, kde na ose x je měřená vzdálenost a na ose y podíl jednotlivých chyb vyplývá, že geometrické chyby jsou dominantní složkou. Následující Obr. 6 ukazuje podíl jednotlivých chyb. Uplatňují se zde chyby dotyku a kalibrační procedury snímacího systému a chyby způsobené fluktuací teploty.



Obr. 6 Geometrické chyby tvoří dominantní část na chybě celkové

Geometrické chyby, chyby způsobené malými nepřesnostmi vzájemně se pohybujících součástí souřadnicových měřicích strojů (SMS) (vliv vůlí, drsnosti povrchu, chyby přímostí vedení, apod.) se podílejí více než 60 % na celkové chybě. Tyto chyby se často chovají jako systematické chyby s dobrou opakovatelností, a je tedy možné je pomocí korekčních map softwarově snížit nebo zcela vyloučit. Zjišťovat se budou v této práci experimentálně pomocí laserového interferometru a přesného souřadnicového stroje a některé se odhadnou.

5. Matematický popis

V literatuře, ze které vycházíme [3],[1],[2] jsme předpokládali, že pracujeme s "velkými" hodnotami argumentů základních matic odpovídajícími "velkým" pohybům těles. V teorii kinematické přesnosti polohy mechanismů se však setkáváme s "malými" argumenty odpovídajícími chybám ("malým" pohybům). Je ovšem relativní, co je "velký" a co je "malý" pohyb. S ohledem na účel této práce budeme v dalším za "velké" pokládat měřené hodnoty řádu [mm] nebo [rad] a za "malé" chyby těchto hodnot vyjádřené v [μm] nebo [μrad], tedy o dva řády menší hodnoty. Malé veličiny budeme označovat symbolem Δs , kde s je příslušná souřadnice, o jejíž malou hodnotu (chybu) se jedná.

Malé pohyby neznamenají žádné změny v základních maticích posuvů, takže je např. pro posuv ve směru osy x

$$\mathbf{T}_x(\Delta x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

a podobně u matic \mathbf{T}_y a \mathbf{T}_z pro posuny ve směrech y a z. Ke změnám však dojde v základních maticích rotací, které obsahují funkce sinus a kosinus. Užijeme-li pro malé argumenty těchto funkcí aproximace pouze prvními členy McLaurinovy řady, tj.

$$\sin\Delta\varphi \doteq \Delta\varphi, \quad \cos\Delta\varphi \doteq 1$$

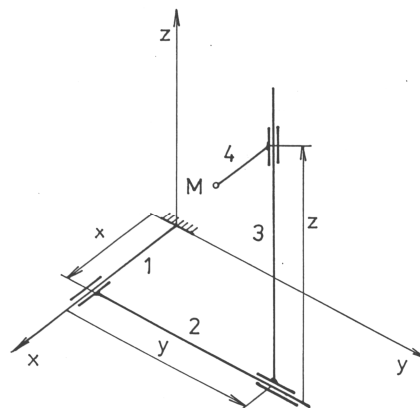
změní se tvar základních matic rotací následovně např. pro rotaci kolem osy x

$$\mathbf{T}_{\varphi_x}(\Delta\varphi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta\varphi_x & 0 \\ 0 & \Delta\varphi_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

a podobně pro matice \mathbf{T}_{φ_y} a \mathbf{T}_{φ_z} a podobně pro rotace kolem osy y a z.

6. Příklady modelů - aplikace problematiky měření přesnosti

Začneme třísouřadnicovým měřicím strojem: Konkrétně byl vybrán stroj, u něž je pohyb měřicí hlavy realizován třemi posuvnými pohyby (např. stroj CMM5 SIP instalovaný v ČMI). Kinematické schéma uvažovaného stroje je na Obr. 7.



Obr. 7 Kinematické schéma měřicího stroje SIP v ČMI Praha

Budeme rozlišovat tři velké pohyby dané hodnotami x , y , z a 21 malých pohybů (chyb). Z malých pohybů vyčleníme 3 konstanty (chyby kolmosti os x , y , z) a 18 proměnných, z nichž každé z os náleží šest.

Vzhledem k počtu proměnných, které vstupují do problému, je třeba věnovat pozornost jejich označení. V dalším textu použijeme dříve zavedené označení, které nám připadá logické a průhledné. Tak např. v označení $\Delta\varphi_x(y)$

Δ je symbol malého pohybu (chyby)

φ_x je souřadnice, které se chyba týká, zde natočení kolem osy x

y v závorce říká, že uvažovaná chyba je funkcí proměnné y .

Konečně výslednou transformační matici reálného pohybu při uvážení malých pohybů chyb podle [1, 2]. Podle ní dostaneme z rovnice se všemi chybami takto

$$\mathbf{T}_{1\bar{4}} = \mathbf{T}_{14} \mathbf{C}_{4,14} = \begin{bmatrix} 1 & -\sum \Delta\varphi_z & \sum \Delta\varphi_y & x + \sum \Delta x \\ \sum \Delta\varphi_z & 1 & -\sum \Delta\varphi_x & y + \sum \Delta y \\ -\sum \Delta\varphi_y & \sum \Delta\varphi_x & 1 & z + \sum \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Dospěli jsme tedy k tomuto závěru:

Pokud měřicí stroj pro ideální polohu bodu M danou radiusvektorem \mathbf{r}_{1M} udává hodnoty x , y , z je skutečná poloha \bar{M} bodu M dána radiusvektorem

$$\mathbf{r}_{1\bar{M}} = \mathbf{T}_{1\bar{4}} \mathbf{r}_{4M} \quad (6.2)$$

Poslední rovnice zahrnuje vliv všech 18 dílčích chyb a představuje kinematický model přesnosti měření CMM5 SIP. Z jejich znalosti a kombinací výpočtu lze najít extrém, který vyústí k opravě stroje) [8].

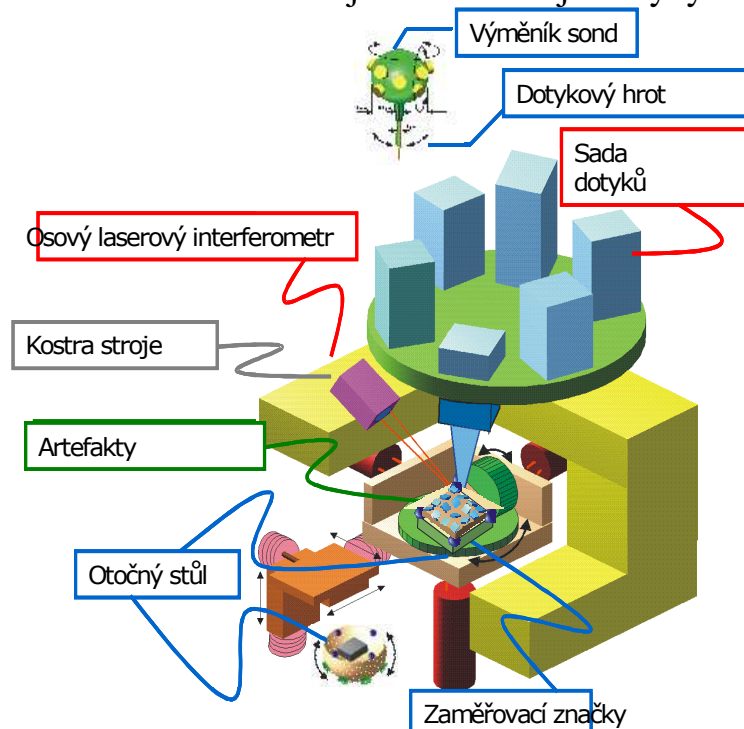
7. Měřicí stroj pro měření dílů nanotechnologií - Nano CMM

Druhým příkladem je měřicí stroj Nano CMM. Koncem roku 2006 byl zahájen projekt EU Nano CMM. Cílem je vyrobit souřadnicový měřicí stroj, určený pro měření součástí nanotechnologií s přesností měření v desítkách nm. ČMI dostal v prvním pololetí projektu za úkol zpracovat teoretický rozbor a provést predikci možné přesnosti budoucího stroje. Navržená konstrukce sestává z rámu z karuselu s výměnnými sondami ze stolu, který vykonává prostorový posuvný pohyb. Na něm je dále umístěn otočný stůl se dvěma stupni volnosti, jak znázorňuje Obr. 8.

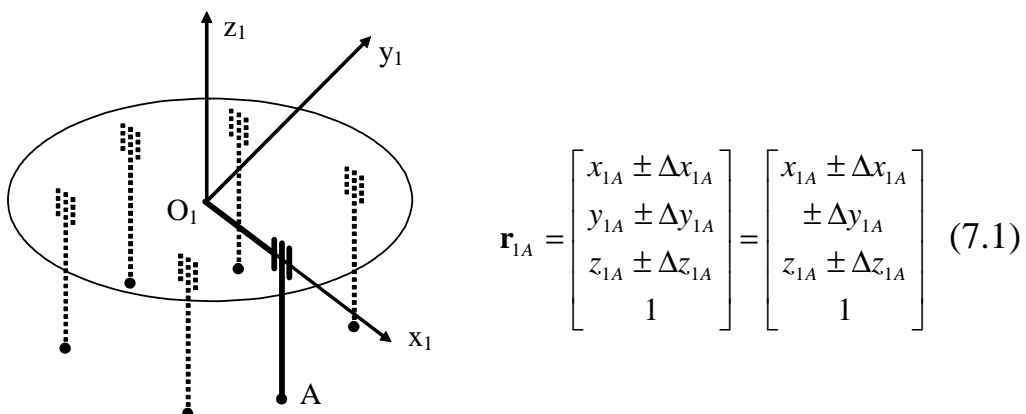
Spodní strana posuvného stolu i boky jsou opatřeny zrcadly a poloha se bude měřit laserovými interferometry. U tohoto stroje je dodržen Abbého princip, kdy měřený (snímaný) bod na předmětu je v průsečíku os všech tří laserových interferometrů. Díky této skutečnosti je nutné při tvorbě modelu přistupovat k tomuto stroji rozdílně oproti klasickému stroji, kde bylo definováno 21 geometrických chyb.

7.1 Kinematický a matematický model

Kinematický model dostaneme náhradou pohybů jednotlivých těles ideálními geometrickými pohyby. Matematický model odvodíme užitím metody transformačních matic. U tohoto stroje se zavedou jen chyby základních pohybů.



Obr. 8 Návrh Nano CMM souřadnicového stroje pro komponenty nanotechnologií



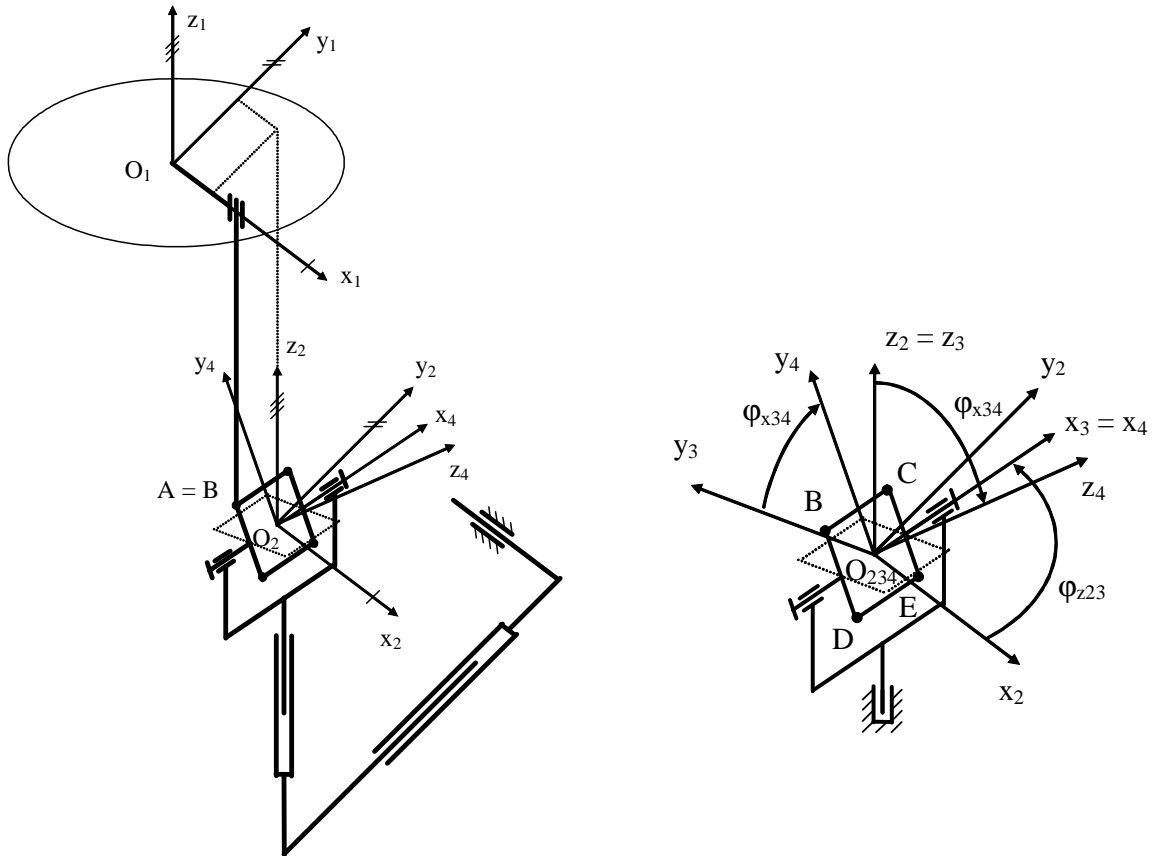
Obr. 9 První otevřený řetězec do bodu A na karuselu, unášející sondy

Na tomto stroji byly popsány dva nezávislé otevřené řetězce. Jeden popisuje cestu k bodu dotyku na karuselu (7.1), který unáší dotykové čidlo až k bodu dotyku (Bod A na Obr. 9), druhý řetězec popisuje cestu stolu s třemi posuvy a dvěma rotacemi (7.2 až 7.4) k bodu dotyku na měřeném objektu (Bod B na Obr. 10).

$$\mathbf{r}_{4B} = \begin{bmatrix} x_{4B} \\ y_{4B} \\ z_{4B} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{4B} \\ y_{4B} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

$$\mathbf{r}_{2B} = \begin{bmatrix} x_{2B} \\ y_{2B} \\ z_{2B} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{24} \mathbf{r}_{4B} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(\varphi_{z23} \pm \Delta\varphi_{z23}) \mathbf{T}_{\varphi_x}(\varphi_{x34} \pm \Delta\varphi_{x34}) \begin{bmatrix} x_{4B} \\ y_{4B} \\ z_{4B} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

$$\mathbf{r}_{1O_2} = \begin{bmatrix} x_{1O_2} \pm \Delta x_{1O_2} \\ y_{1O_2} \pm \Delta y_{1O_2} \\ z_{1O_2} \pm \Delta z_{1O_2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$



Obr. 10 Oba otevřené řetězce, popisující postupnou transformaci souřadnicového systému

$$\mathbf{r}_{1B} = \mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{24} \mathbf{r}_{4B} = \underbrace{\mathbf{T}_x(x_{1O_2} \pm \Delta x_{1O_2}) \mathbf{T}_y(y_{1O_2} \pm \Delta y_{1O_2}) \mathbf{T}_z(z_{1O_2} \pm \Delta z_{1O_2})}_{\text{jenom posuv}} \underbrace{\mathbf{T}_{\varphi_z}(\varphi_{z23} \pm \Delta\varphi_{z23}) \mathbf{T}_{\varphi_x}(\varphi_{x34} \pm \Delta\varphi_{x34})}_{\text{relativní sfirický pohyb}} \mathbf{r}_{4B} \quad (7.5)$$

Kdyby všechny geometrické chyby $\Delta x_{1A}, \Delta y_{1A}, \Delta z_{1A}, \Delta x_{1O_2}, \Delta y_{1O_2}, \Delta z_{1O_2}, \Delta\varphi_{z23}, \Delta\varphi_{x34}$ byly nulové, potom by se poloha vektorů shodovala (7.6).

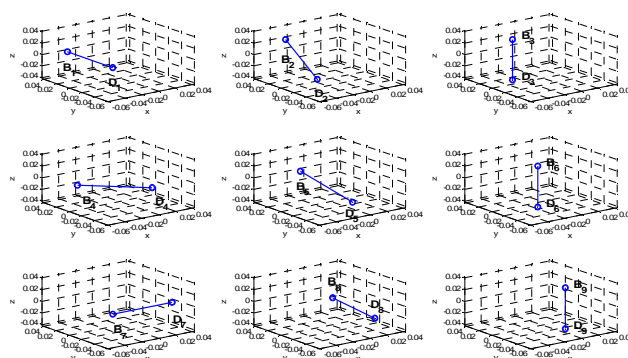
$$\mathbf{r}_{1A} = \mathbf{r}_{1B} \quad (7.6)$$

V prvním kroku se zkoumala nepřesnost s jakým se tyto dva body v prostoru mohou lišit (7.1 a 7.5). Předpoklad byl, že dílčí pohyby mohou mít největší chyby 10 nm a úhlovou chybu $3 \cdot 10^{-7}$ [rad]. Velikost chyb byla přiřazována jednotlivým pohybům postupně, sledovala se kumulace chyb a extrém chyby výsledné. Ta vyšla 54 nm, tedy pětinasobek dílčí chyby.

Obdobně se postupovalo pro simulaci měření vzdálenosti dvou bodů B a D (7.7 a 7.8) v různých polohách i natočení v prostoru stroje, jak znázorňuje Obr. 11.

$$\mathbf{r}_{1B} = \mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{24} \mathbf{r}_{4B} = \underbrace{\mathbf{T}_x(x_{1O_2}) \mathbf{T}_y(y_{1O_2}) \mathbf{T}_z(z_{1O_2})}_{\text{jenom posuv}} \underbrace{\mathbf{T}_{\varphi_z}(\varphi_{z23}) \mathbf{T}_{\varphi_x}(\varphi_{x34})}_{\text{relativní sférický pohyb}} \mathbf{r}_{4B} \quad (7.7)$$

$$\mathbf{r}_{1D} = \mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{24} \mathbf{r}_{4D} = \underbrace{\mathbf{T}_x(x_{1O_2}) \mathbf{T}_y(y_{1O_2}) \mathbf{T}_z(z_{1O_2})}_{\text{jenom posuv}} \underbrace{\mathbf{T}_{\varphi_z}(\varphi_{z23}) \mathbf{T}_{\varphi_x}(\varphi_{x34})}_{\text{relativní sférický pohyb}} \mathbf{r}_{4D} \quad (7.8)$$



Obr. 11 Simulace měření vzdálenosti dvou bodů v Nano CMM

Při této simulaci měření se ještě v druhé fázi uvažovala nehomogenita chyby. V ose z se uvažovala v druhém případě dvojnásobná chyba, viz Obr. 12, než v ostatních osách. (Optické stroje, které se fokusují na bod mohou mít v ose z větší chybu).

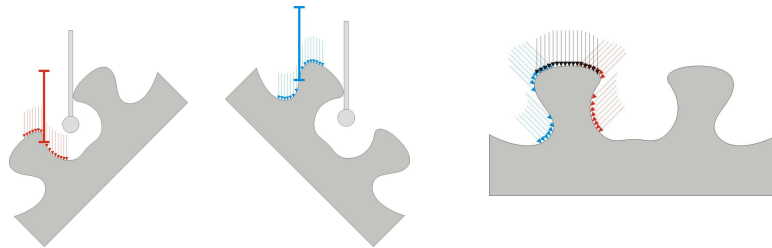
Position	φ_{z23} [deg]	φ_{x34} [deg]	Task 1 - max ΔBD [nm]	Task 2 - max ΔBD [nm]
B ₁ D ₁	0	0	20	20
B ₂ D ₂	0	45	28	42
B ₃ D ₃	0	90	20	40
B ₄ D ₄	45	0	28	28
B ₅ D ₅	45	45	34	48
B ₆ D ₆	45	90	20	40
B ₇ D ₇	90	0	20	20
B ₈ D ₈	90	45	28	42
B ₉ D ₉	90	90	20	40

Obr. 12 Výsledky simulovaných měření dvou bodů BD

Největší vypočtená vzdálenost byla při uvažování maximální chyby 10 nm ve všech osách vychází celková chyba 34 nm, při dvojnásobné chybě v ose z je celková chyba 48 nm. Těto problematice, kdy v jedné ose je větší chyba, která je definována jako anisotropická chyba, je nutné věnovat velkou pozornost. Na ní závisí celková přesnost stroje, od ní se odvíjí strategie měření.

Nehomogenní (anisotropická) chyba měření

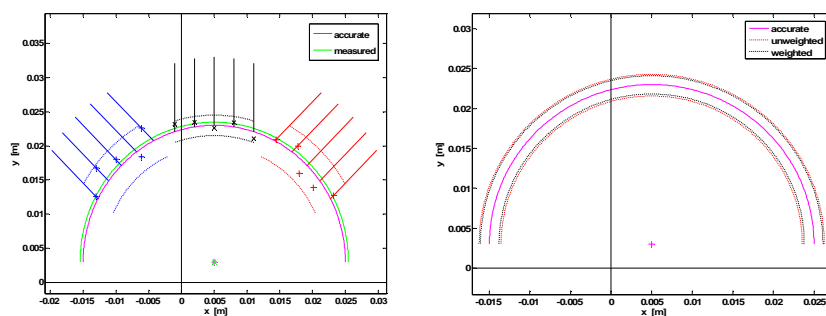
Při modelování a simulaci měření je nutné předpokládat, že některá místa na měřeném předmětu nebudou z určitého směru přístupná, jak znázorňuje Obr. 13.



Obr. 13 Měření objektu s anisotropickou chybou měření

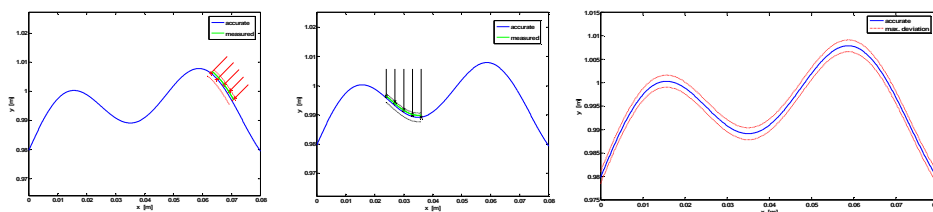
Bude tedy nutné buď s předmětem otáčet, a to může zvýšit chybu měření, nebo měřit jinou sondou z jiného směru, s jinou chybou měření.

Je tedy zapotřebí modelovat měření, kde se budou vyskytovat výsledky z různých směrů s rozdílnými chybami (nejistotami) měření.



Obr. 14 Měření kružnice z různých směrů s rozdílnou nejistotou měření

Byla provedena simulace měření kružnice z různých směrů podle Obr. 14. Jednotlivým směrům přiřazena rozdílná chyba měření, v rámci přiřazené chyby měření náhodným číslem byly generovány naměřené body (10000 bodů). Z nich se pak hledal optimální výsledek, tedy nejmenší chyba vážením. Směru, ve kterém byla nižší chyba se přiřazuje vyšší váha: Body shora mají váhu 10 x vyšší, zprava 2x oproti bodům zleva. Tímto způsobem se hledala nejmenší

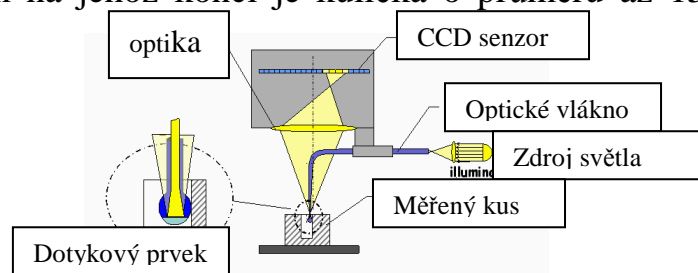


Obr. 15 Skládání objektu z dílčích skupin měření - „mraků měření“

nejistota měření hledaného předmětu. Obdobně se modelovalo měření v různých místech, z různých směrů a s rozdílnou nejistotou měření, viz Obr. 15. Použily se funkce vážení, metoda dotýkání překládání se zvolenými body, funkce best fit a další. (Styting, overlaping, best fit). Cílem těchto simulací, které byly provedeny v prostředí Matlab, je nalezení tvaru s co nejmenší nejistotou. Toto modelování předchází dalšímu kroku, kterou je navigace měření, resp. volení vhodné strategie, která vede k rozhodnutí, zda objekt měřit např. více druhy sond nebo natáčením objektu.

7.2 Virtuální měřicí stroj pro modelování měření

U budoucího stroje Nano CMM se předpokládá jako jeden z dotykových senzorů optické vlákno. Stroj Werth v ČMI disponuje mimo klasického dotykového a optického snímače velmi zajímavým (patentovaným) měřicím systémem založeným na použití skleněného vlákna a CCD kamery, Obr. 16. Tento systém vyniká možností měřit dotykově i velmi malé průměry otvorů a tenkostěnné výrobky s minimální přitlačnou silou. Sonda samotná je tvořená optickým vláknem na jehož konci je kulička o průměru až 15 μm . Vláknem



Obr. 16 Měření s optickým vláknem na stroji Werth

prochází světlo, které kuličku rozsvítí. Tento světelný bod sleduje shora přes soustavu čoček CCD kamera, která vyhodnocuje polohu bodu při dotyku. Přitlačnou sílu tvoří jen pružnost ohybu vlákna, která se počítá v řádu jednotek μN . Pohyb skleněné kuličky lze sledovat i s vypnutým vnitřním osvětlením. Některá měření, aplikovatelná pro Nano CMM se již na tomto stroji provádějí.

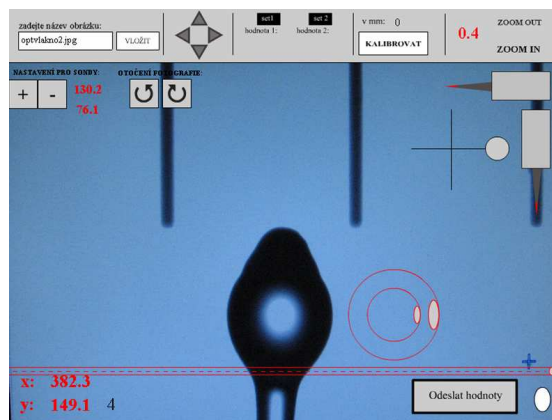
Pro širší možnosti modelování budoucího stroje Nano CMM, pro modelování strategie měření, navigaci a další byl vytvořen internetový virtuální multisenzorový měřicí stroj. Tento simulační program on-line, dostupný na internetu pro partnery projektu je založen na kinematickém modelu měření pomocí Nano CMM z kapitoly 7.1.

Všechna měření se přenášejí on line a okamžitě zpracovávají pomocí internetu ve vzdáleném serveru. Měřicí software si může účastník vyvolat přes internet, při měření ve výzkumných projektech komunikovat s partnery on line, může využít stroje jako pomůcky při simulaci měření. Virtuální stroj obsahuje hroty různých tvarů a velikostí, dotykové kuličky, sondy zakončené dotykovými kuličkami, optický zaměřovací kříž, kružnice a mezikružní, které lze zvětšovat a

zmenšovat podle měřeného tvaru, přímky se zvětšujícím se tolerančním polem, možnost otáčení měřeného předmětu, atd. Vše se ovládá myší (nebo klávesami) vašeho PC. Tento virtuální stroj je software ke zpracování dvourozměrného obrazu, ale obsahuje vlastnosti reálného měřicího stroje, byl vytvořen jako podpůrný software k modelování měření na Nano CMM.

Způsob měření:

Obraz do prostoru měřicího stroje se vkládá ze CCD kamery, fotografie nebo mikroskopu, jak znázorňuje Obr. 17. Zde je zachyceno zakončení optického vlákna s kuličkou spolu s měřítkem, kde rozteč čar je 0,2 mm. V tomto prostředí lze měřit různé poměry vzhledem k přenesené míře měřítkem. Měřený objekt lze kalibrovat porovnáním s vloženou délkou, zvětšovat, zmenšovat a lze s ním otáčet. To přináší možnosti přeuročených měření, nových strategií měření, využití všech známých funkcí jako je best fit, max min – Čebyševovo rozdělení apod. Jeden jediný bod lze současně měřit několika senzory.



Obr. 17 Vložený obraz zakončení optického vlákna do prostoru virtuálního stroje

Virtuální měřicí stroj umožňuje relativní měření v bodech monitoru nebo skutečné délkové měření v mm, μm , nanometrech. Optickým křížem, dotykovým hrotem se najede na měřený bod a vloží se souřadnice x, y tohoto bodu. Pak se najede na další bod a postup se opakuje. Data jsou přenášena okamžitě k vyhodnocení pomocí internetu na vzdálený server. Virtuální stroj „měří“ i odchylky tvaru jako je přímočarost, kruhovitost apod.

V případě skutečného měření se vkládá do obrazu délkový nebo plošný rozměr pomocí skleněných měřítka nebo (2D artefaktů). Jak skleněná měřítka, tak 2D masky se kalibrují na stroji Werth LPM ČMI Praha.

Internetové rozměrové měření na PC s vložením skutečné délky do obrazu je pomocníkem při měření rozměru, vzdálenosti, délek, tvaru i vzájemné polohy.

Všechny výše uvedené modely, simulace a matematické postupy vedou k poznání vlivu dílčích konstrukčních uzlů stroje nebo přístroje na celkovou chybu, tedy na přesnost měření a tato poznání vedou k úpravě konstrukce.

8. Závěr

Cílem této habilitační přednášky je popis příkladů metod modelování měřicích zařízení. ČMI vlastní dva nejpřesnější stroje SIP a Werth, a jeho cílem je v rámci výzkumu hledat optimální měřicí vlastnosti. Velmi dobré výsledky v nevyšších mezinárodních porovnání měření, ale i velmi dobré výsledky v teoretických odvozeních přinesly nabídku k účasti na mezinárodních projektech. V těchto projektech, kde bylo cílem zvýšit přesnost měřicích strojů, kde se měla navrhnout a vyrobit samocentrovatelná hlava, a kde se má navrhnout nový souřadnicový měřicí stroj pro nanotechnologie se vždy dobře uplatnily teoretické práce z oblasti tvorby kinematických modelů a jejich matematický popis. Jedna z velmi často aplikovaných metod Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky ČVUT FS v Praze je metoda transformačních matic [1], [2], [3]. Touto metodou byl modelován souřadnicový měřicí stroj SIP, experimentálně se zjistily dílčí geometrické chyby, ty se zadaly do algoritmu jako geometrické chyby a iteračním postupem se našly optimální měřicí vlastnosti stroje. Stejnou metodu se použilo při návrhu samocentrovatelné hlavy. Algoritmus, vyvinutý a odladěný pro několik variant sondy převzal partner projektu EU Unimetrik a později univerzita v Zaragoze. Oba partneři vyrobili sondu a použili algoritmus, navržený na ČVUT v Praze. V současnosti probíhají práce na konstrukci nového souřadnicového měřicího stroje – Nano CMM pro měření součástí nanotechnologií. I zde se zapojil ČMI s modelem do projektu. Byl proveden výpočet celkové chyby. Z modelových výpočtů vychází, že celková chyba měření může být až pětinasobek chyby jediného dílčího pohybu. Proto se velký důraz u návrhu stroje klade i na strategii měření, navigaci na použití matematických a statistických funkcí. Modelování probíhá i ve virtuálním měřicím stroji, který byl v prostředí programovacího jazyka Flash pro tyto účely naprogramován.

Za hlavní dosažené vědecké přínosy prezentované v habilitační přednášce lze považovat:

1. Sestavení modelu souřadnicového měřicího stroje SIP, modelu samocentrovatelné hlavy a modelu Nano CMM spolu s matematickým popisem s cílem predikce přesnosti měření na těchto zařízeních.
2. Aplikace poznatků z měření na velmi přesných strojích do návrhu nového Nano CMM, kterým je nový souřadnicový stroj pro díly nanotechnologií.
3. Vytvoření simulačních programů v prostředí Matlab a Flash pro modelování měření Nano CMM.

Modelem zjištěné vlivy dílčích uzlů s dílčími geometrickými chybami vedou k úpravě celé konstrukce a následně ke snížení celkové chyby měření.

I když v ČR není výrobce souřadnicových strojů, byl ČMI a ČVUT FS Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky přizván ke spolupráci na vývoji nového stroje pro komponenty nanotechnologie v rámci projektu EU.

Literatura

- [1] Stejskal, V., Valášek, M.: Kinematics and dynamics of machinery, Chapter 11 Accuracy and Sensitivity of MBSs, Marcel Dekker, Inc., str. 405-423, New York, 1996
- [2] Valášek, M. - Stejskal, V.: The kinematic accuracy of spatial mechanisms and robot manipulators, acta technica CSAV, No 4, str. 453-478, Praha, 1987
- [3] Stejskal, V., Vampola, T.: Přesnost polohy měřicího stroje, Zpráva FS-ČVUT-231/98/6 Praha, říjen 1998
- [4] Trapet, E; Wäldele, F.: Determination of Parametric Errors of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools using Reference Objects. In: Pfeifer, T. (Hrsg.): 3rd Intern. IMEKO Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, Aachen September 1989, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989 (VDI-Berichte 761), S.163-175
- [5] Trapet, E; Wäldele, F.: The Virtual CMM Assessing Measuring Uncertainties. In: Proceedings of the FVM-Conference "Calibration of Coordinate Measuring Machines", Kopenhagen (Dänemark), 1995, S. 1-15
- [6] Trapet, E., Franke, M., Härtig, F., Schwenke, H., Wäldele, F., Cox, M., Forbes, A., Delbressine, F., Schellekens, P., Trenk, M., Meyer, H., Moritz, G., Guth, Th., Wanner, N.: Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, Final Project Report MAT1-CT94-0076, erschienen als PTB-Bericht F-35, Part 1 and 2, ISBN 3-89701-330-4, 1999
- [7] A. Balsamo, A. Meda, 2006, Geometrical Error Compensation of Coordinate Measuring Systems, Nanotechnology and Precision Engineering 4: 83-91, Tianjin, China, ISSN 1672-6030.
- [8] Zelený, V., Stejskal, V.: The Most Recent Ways of Co-ordinate Measuring Machines Calibration, přednáška na XVI IMEKO World Congress IMEKO 2000, Proceedings Volume 1 Austrian Society for Measurement and Automation, Sept. 25-28, 2000, Viena Austria
- [9] Zelený, V., Skalník P.: Redundant Measurements Using Laser Interferometer on Coordinate Measuring Machine, IMEKO , VDI, VDE Gesellschaft, Erlangen, SRN, říjen, 2004
- [10] Zelený, V., Bauma, V., Skalník, P.: Kalibrace otočného stolu souřadnicového měřicího stroje, Metrologie, 2 / 2004 ročník 13, s. 6 - 9, Praha, 2004
- [11] Zelený, V., Skalník P.: Misurare in modo ridondante con una CMM e un interferometro laser; Probing, No 12/2005, Ottobre, p. 10-13, Torino, Italia, 2005
- [12] Trapet, E., Aguilar, J.A., Spaan, H., Yague A., Zeleny V.: Self-centering probes with parallel kinematics to verify machine-tools, Precision Engineering 30, s. 165-179, Elsevier, 2006

Odborný životopis – Ing. Vít Zelený, CSc.

Vít Zelený (*1947 v Praze) po střední průmyslové škole strojní v Praze 5 absolvoval Fakultu strojní ČVUT v Praze v oboru aplikovaná mechanika v roce 1971. Po té nastoupil jako výzkumný pracovník oboru vnitřní aeromechaniky SVÚSS Praha Běchovice. V roce 1982 obhájil kandidaturu jako vědecký pracovník v SVÚSS Běchovicích v oddělení vnitřní aerodynamiky lopatkových strojů. Byly mu přiznány čtyři patenty, jeden realizován. V roce 1986 nastoupil jako metrolog oddělení kvantových generátorů Laboratoří primární metrologie Československého metrologického ústavu. Od roku 1995 působí jako vedoucí oddělení technické délky Laboratoří primární metrologie (LPM) ČMI.

V roce 1986 se zapojil do pedagogické činnosti na SPSS Praha 1, Betlémská ul., v roce 1992 přechází na ČVUT Fakultu strojní, nejdříve jako externí učitel na katedře Mechaniky a od r. 1994 až dosud jako řádný odborný asistent této katedry, nyní Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. Byl vedoucím šesti diplomových prací a studentské práce – Grant ČVUT IG 309807102).

Ing. Vít Zelený, CSc. se významně podílel a podílí na řešení celé řady vědeckovýzkumných a průmyslových projektů:

- 1996 až 1998 Grant GA ČR č. 101/96/1599 „Ověřování tříosých měřicích strojů s přímou návazností na státní etalon délky“
- 1998 až 2000 Mezinárodní projekt EU „MESTRAL: „Artefacts and Methods to Establish Traceability of Large CMMs“, project SM&T, Partners: Trimek Spain, DEA Braun & Sharpe Italy, Zeiss Germany, IMGIC Italy, Volkswagen Navarra, PTB Germany, CMI Czech Republic), SMT4-PL-97-2330
- 2000 až 2003 Mezinárodní projekt MT-CHECK Highly Efficient Machine Tool Checking System, based on Ball Artefacts and Self-Centring Three axis Sensor
- 2000 až 2003 Mezinárodní projekt EASYTRAC (Easier and Cheaper Traceability in Industry by Up to Date Methods of Calibration (Measuring and Testing RTD Project)
- 2001 až 2005 Mezinár. projekt EVIGeM (European Virtual Institute for Geometrical Metrology) Growth Project GTC1-20 –43025
- 2005 až 2006 Mezinár. projekt TraCES (Transnational Calibration Expert Service) projekt Commission of the EU Directorate-General Information Society Communication Networks, Applications eTen
- 2006 až 2009 Mezinárodní projekt Nano CMM, Universal and Flexible Coordinate Metrology for Micro and Nano Components Production Project Number: FP6-026717-2
- 1999 až 2003 Mezinárodní konference organizované autorem: First International Workshop (Coordinate Measuring Machines Calibration, June 1-2, 1999), Second June, 2001, Third International Workshop on CMM Calibration, June 16, 17, Prague, 2003