

Měření vlastností obráběcích strojů, metody a přístroje pro měření

David Burian, Pavel Bach, Otakar Horejš, Petr Chvojka, Jiří Vyroubal

Abstrakt:

Článek popisuje novinky v oboru měření na obráběcích strojích. Jedná se zejména o měření deformací, jak statických tak i dynamických, způsobených termálními vlivy, mechanickým zatížením stroje a pod. Dále jsou zde uvedeny senzory pro měření polohy a vibrací. Zvláštní kapitla je věnována měření přesnosti a ustavování obráběcích strojů.

1 Úvod

Měřičským firmám byl na veletrhu vyhrazen pavilon č. 9. Snad i pro nezáměr těchto výrobců senzorů, přístrojové techniky a diagnostiky o účast na veletrhu byly zařazeny v pavilonu společně s CAD-CAM firmami a i tak působil pavilon poloprázdň. Letošní ročník byl jednoznačně ve znamení útlumu expozic. Tento fakt byl obecně pozorovatelný u velkých firem produkujících stroje i nástroje a to to spíše u firem zabývajících se výrobou komponent. Následující kapitoly popisují zajímavosti se kterými se bylo možno na veletrhu setkat a to nejen v expozici pavilonu č. 9.

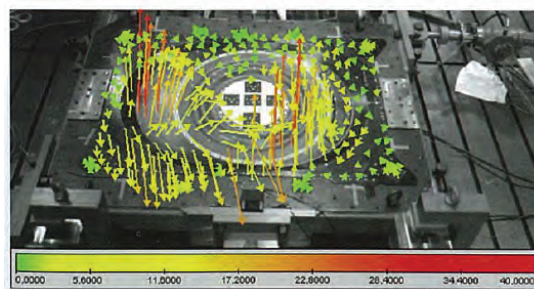
2 Měření statických, dynamických a tepelných deformací a teplot

2.1 Aicon

Firma Aicon představila na veletrhu svůj přístroj na měření deformací způsobených statickým i dynamickým (crash testy, rázové zkoušky) zatížením, teplotními vlivy (sváření, nerovnoměrné tuhnutí výkovků a pod.) na principu setu až čtyř digitálních kamer s CCD čipy, (obr. 1 vlevo). Set je dodáván ve dvou variantách a to:

- s důrazem na rozlišení snímků
- s důrazem na rychlost snímání snímků



Široké využití vidí výrobci hlavně v automobilovém průmyslu. Nejde v podstatě o zařízení využitelné v produkční výrobě, ale např. ve fázi zkoušek prototypu, rozbíhání linek a pod. (častou aplikací je např. sledování změn lícování karoserie po bodovém sváření). Také využití v experimentech s deformacemi nosných prvků obráběcích strojů při teplotních šocích či statickém zatížení je jednou z možností aplikace setu. Firma prodává přístroj i s vyhodnocovacím SW, který vizualizuje průběh deformací v čase (obr. 1 vpravo). Kamery sledují a sw vyhodnocuje pohyb specifických bodů (hran, otvorů a pod.) na zkoumaném objektu a nebo se na ní nalepí speciální adhezivní terčíky. SW umožňuje nastavení mezních hodnot vibrací v jednotlivých místech a po jejich překročení jsou pak tyto barevně odlišeny. Pro každý bod lze získat tři grafy znázorňující jeho prostorové deformace.



Obr. 1: Laserové hlavy (vlevo) a citlivé dopadové plochy (vpravo).

V tab. 1 jsou uvedeny technické parametry obou provedení CCD kamer.

Tab. 1: CCD kamery firmy Aicon

vlastnosti	MoveInspect HF	MoveInspect HR
vyobrazení		
typ	snímání vysokou frekvencí	snímání s vysokým rozlišením
rozlišení CCD čipu	1,3 Mpx	2; 5 Mpx
rychlost snímání	do 490 Hz	do 5 Hz
přesnost	$\pm 0,1$ mm pro kvádr 1x1x0,5 m	$\pm 0,05$ mm pro kvádr 1x1x0,5 m
rozměry	1000x100x100 mm	1000x100x100 mm
hmotnost	7 kg	8,5 kg

2.2 GOM



Obr. 2: 3D digitizér ATOS III firmy GOM




Firma GOM vyvinula novou řadu přesných 3D digitizérů ATOS III (obr. 2). Přístroj umožňuje rychlou digitalizaci tvaru složitých součástek (formy, lopatková kola turbín, prototypy a pod.), namísto pracného scanování na 3D souřadnicovém stroji. Zpracovávající SW je schopen převést součást do CAD dat, namešování jeho povrchu polygonální sítí. Dále je schopen porovnat přesnost výroby součástí s dokumentací a vyznačí místa s největšími odchylkami.

Přístroj se skládá ze dvou kamer, které současně snímají měřený objekt a oba pohledy se SW zpracovávají a vytváří se souřadnicově nezávislý 3D obraz objektu ze 4 milionů bodů nasnímaných během 2 s. Poté co je objekt z jednoho pohledu

nasnímán se buď kamerou nebo objektem pohne tak, aby byly v záběru dosud nezobrazovaná místa objektu. SW automaticky transformuje souřadnice a doplní digitalizovaný model součásti. Velikost součásti je omezena rozměry 150 x 2000 x 2000 mm

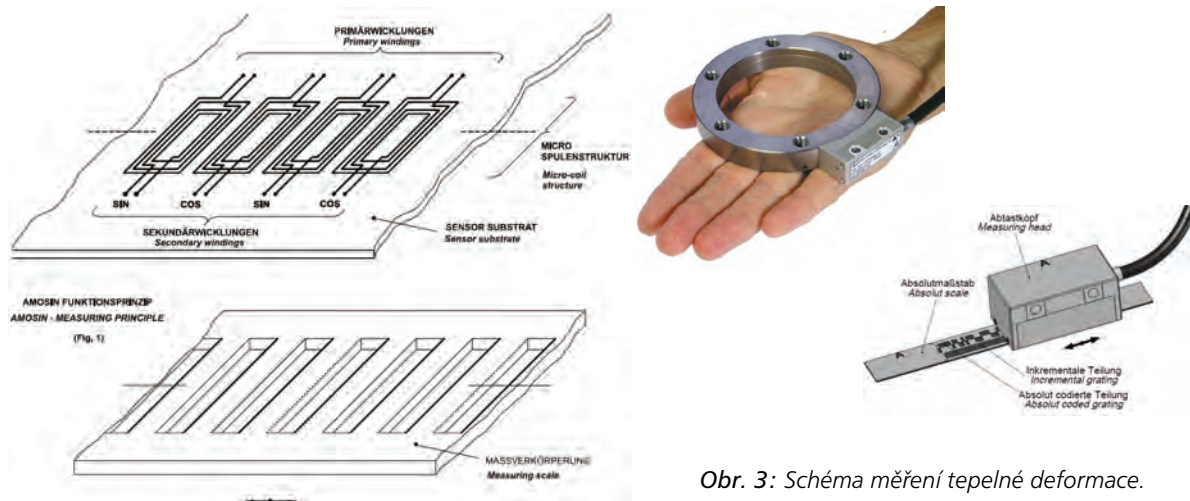
Dále firma vyrábí i přístroje ARAMIS pro 3D deformační měření, obdobu výše uvedeného přístroje **MoveInspect** od **Aiconu** ve vícero provedeních. Opět s velkým rozlišením a menší snímací frekvencí a naopak. Dosahují však při rozlišení 1280 x 1024 bodů (tedy 1,3 Mpx) rychlosti snímání až do 8 kHz (Aramis HS) (tab. 2).

Tab. 2: CCD kamery GOM

vlastnosti	Aramis 4M	Aramis 5M	Aramis HS
vyobrazení			
typ	snímání vysokým rozlišením	snímání vysokým rozlišením	snímání vysokou frekvencí
rozlišení CCD čipu	4Mpx	5Mpx	1,3Mpx
rychlost snímání	od60Hz do 480Hz	od15Hz do 30Hz	500Hz až 8kHz
přesnost	0,01%	0,01%	0,01%
rozměry	510x230x200mm	510x230x200mm	510x230x200mm
hmotnost	3kg	3kg	3kg

2.3 AMO

Firma AMO představila na veletrhu novinku pro měření polohy. Snímač pracuje na principu magnetické indukce (princip indukčnosti). Skládá se ze dvou částí, měřící hlavy a ocelového měřítka (obr. 3 vpravo dole). Ve snímací hlavě je foto-litografickou technikou napařena soustava cívek s přesnou roztečí (obr. 3 vlevo). Ocelové měřítko s obdelníkovými otvory s pravidelnou roztečí svým pohybem podél měřící hlavy indukuje napětí v cívkách (střídavě sin. a cos.). Vznikají tak dva signály sin. a cos. ($2x \sin$ posunutý o 90°). Z těchto signálů lze vytvořit při vhodném zobrazení kružnici, jejíž přesnost deklaruje výrobce 0,1%. Takovýto signál jde dále interpolovat a dosáhnout tak finální přesnosti $\pm 5 \mu\text{m/m}$ a rozlišení až $0,125 \mu\text{m}$. Rychlost pohybu je omezena do 10 m/s při přesnosti $\pm 5 \mu\text{m/m}$ a do 30 m/s při přesnosti $\pm 10 \mu\text{m/m}$ u lineárních měříték. Ocelové měřítko lze ale také upevnit např. na válcové plochy (obr. 3 vpravo nahoře) a vytvořit tak snímač natočení (360° nebo jen segmenty). Zde se přesnost úhlového natočení odvíjí od průměru válcové plochy (např. $\pm 3''$ při průměru 652 mm). Výhodou snímače je jeho odolnost vůči prašnému a vlhkému prostředí (krytí IP67).

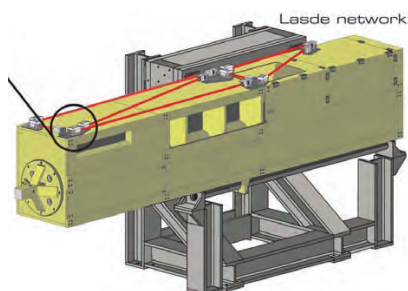


Obr. 3: Schéma měření tepelné deformace.

Tyto měřítka zřejmě vzhledem k přesnosti a stálosti (ocelové měřítko) nebudou konkurovat inkrementálním optickým měřítkům (např. Heidenhain), ale jsou jistě nízkonákladovou variantou pro méně náročné aplikace.

U nás lze také zakoupit podobné senzory od konkurenční firmy RLS vyrábějící lineární magnetické enkodery, v ČR jsou distribuovány firmou Renishaw.

2.4 SINTESI



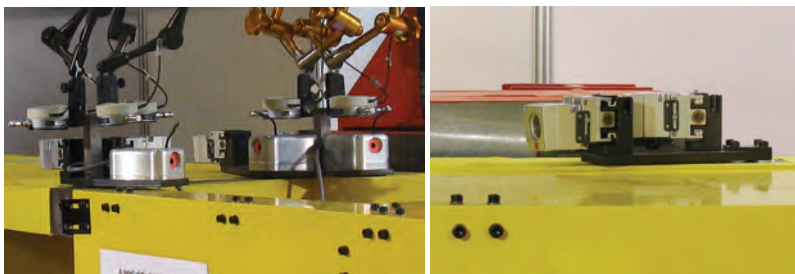
Obr. 4: Schéma měření tepelné deformace.

Firma Sintesi představila na veletrhu novinku pro měření deformací strojních struktur vlivem tepla. Základním stavebním kamenem je i v tomto případě měření vzdálenosti laserem. Systém je tvořen laserovým emitorem na jedné straně a optickým odražečem na straně druhé. Tato dvojice tvoří jeden měřící vektor a je schopna samostatně fungovat a sledovat průběh deformace konstrukce mezi oběma prvky v reálném čase. Vektory je možné libovolně napojovat do série a také tvořit celou měřící síť ve 2D i 3D prostoru.

Napojování vektorů je realizováno v uzlech. Uzel může tvořit teoreticky libovolný počet vektorů. Navázání jednoho vektoru na druhý do série pro měření v jedné přímce je řešeno pouhým

umístěním laserového emitru druhého vektoru těsně za optický odražeč prvního vektoru. Speciální výpočetní software pak dle zadané sítě vypočítává v reálném čase deformaci v žádaném místě. Nevýhodou tohoto kompletu je maximální dosah paprsku 2 metry. Pro sledování větších celků narůstá počet instalovaných vektorů. I přes tento fakt výrobce prozatím neuvažuje o zvětšení dosahu.



Podrobnější informace o prezentovaném systému výrobce neuvádí ani na svých webových stránkách. Na veletrhu byl systém předveden v živém stavu, kdy byla sledována deformace testovací pinoly zatěžované z jedné strany instalovanými tepelnými zdroji. Průběh deformace ve směru Y a Z byl během veletrhu pro ověření sledován i standardním laserem



Obr. 5: Laserové hlavy (vlevo) a citlivé dopadové plochy (vpravo).

firmy API. Vzájemný rozdíl obou systémů se pohyboval mezi 10 a 20-ti mikrometry v obou osách. Udávaná přesnost systému Lasde činí $\pm (0,000005 \times L)$ [mm]. L je délka měřícího paprsku.

Tab. 3: laserové snímače firmy Sintesi

snímač	vlastnosti	obr.
LASDE laserový systém pro měření deformací (statických)	max. měřící vzdálenost: 2 m měřící rozsah: ± 5 mm rozlišení: $0,5 \mu\text{m}$ max. rychlost měřeného předmětu: 4 mm/s přesnost: $\pm (0,005 \times L) \mu\text{m}$ rozměry: 80x50x40 mm hmotnost 100 g komunikace RS 485, RS232, TTL	
ENLAS laserový systém pro měření rychlosti (dynamických) enkoder	max. měřící vzdálenost: 1,5 m rozlišení: $0,6 \mu\text{m}$ max. rychlost měřeného předmětu: 100 mm/s přesnost: $\pm (0,005 \times L) \mu\text{m}$ rozměry: 80x50x40 mm hmotnost 100 g komunikace RS 485, RS232, TTL	



3 Měření hlučnosti a vibrací

Na výstavách EMO je tato problematika tradičně velmi málo zastoupená. Lze ji vystopovat v některých aplikacích inovačně vedoucích firem jako je Mazak, Okuma, Mori Seiki a pod. Primární výrobci přístrojů a sensoriky pro měření vibrací a hluku nebývají zastoupeni téměř nikdy. Vyskytují se zde firmy aplikující tyto přístroje pro inprocesní měření, vyvažování, adaptivní řízení a mechatroniku. Sem patří především firmy **Marposs, Artis, IFM, Promotec, MPM, OMATIVE systems, Brankamp** atd. Z těchto firem se výstavy EMO 2009 účastnily pouze první dvě jmenované (které jsou již delší dobu finančně porpojeny). Jejich expozice nepřinesla nic nového. Firma Marposs vydávala leták se seznamem aplikací jejich výrobků na strojích vystavovaných na EMO. Šlo však o systémy známé již z předešlých výstav. Firma **Okuma** vystavovala systém automatizovaného vyvažování obrobků typu kotouč na svých soustruzích. Vibrace byly měřeny akcelerometrem na vřeteníku a integrovaný vyvažovací SW spočetl množství a lokaci odebraného materiálu pro dovyvážení kotouče. Více viz kap. "Inteligentní a mechatronické systémy".

3.1 SINTESI

Již zmíněná firma **Sintesi** prezentovala dva akcelerometry na principu MEMS (kapacitní). Svoji přesností se sice nevyrovňají piezoelektrickým akcelerometrům používaným v diagnostice, ale jako nízkonákladová varianta jsou více než zdařeným pokusem. Zejména model Triax s interním zpracováním dat je velice kompaktní. Výhodou je, že mohou sloužit nejen jako senzory pro monitoring, ale jsou uzpůsobeny i komunikaci přes ethernet a mohou tak fungovat jako vstupy do zpětné vazby řízení pohonu a eliminovat tak vibrace stroje, které jsou přenášeny a zesilovány právě pohony stroje. (více tab. 4).

Tab. 4: Akcelerometry firmy Sintesi

snímač	vlastnosti	obr.
DAS kapacitní tříosý akcelerometr lineární + tříosý akcelerometr natočení	frekvenční rozsah: do 100 Hz amplitudový rozsah ± 6 g práh šumu: 0,3g, 0,065 ad/s příčná citlivost: $\pm 0,1\%$ rozměry: 80x80x20 mm, hmotnost 400 g komunikace: ethernet datový tok: max. 3 kHz	
TRIAX kapacitní tříosý akcelerometr + procesor a logger collision check	frekvenční rozsah: do 100; 500 Hz, 2; 3; 5 kHz, amplitudový rozsah ± 2 ; 6; 18; 70 g práh šumu: 0,002 g přesnost: $\pm 0,005$ (pro 2 g) až 1 g (pro 70 g) rozměry: 30x30x25 mm; 56x56x32 mm hmotnost 400 g komunikace: RS 485, ethernet datový tok: max. 5; 12 kHz digitální vstup i výstup (alarmy) FFT, peak, paměť	

4 Měření přesnosti obráběcích strojů

Z pohledu měření a analýzy přesnosti obráběcích strojů nebyla výstava EMO 2009 příliš přínosná. Oproti předchozím ročníkům konaným v Hannoveru, bylo možné zřetelně zaznamenat nezáměr vystavovatelů. Tradiční producenti přesných měřidel a přípravků pro analýzu přesnosti obráběcích strojů nebyli přítomni. Ať už jde o výrobce přesných elektronických libel, firmu Wyler, nebo výrobce přesných interferometrů, trackerů a přenosných CMM, firmu API. Podobný stav panoval také mezi výrobci snímačů a komunálních měřidel. Lze se domnívat, že tento stav je způsoben jednak všudepřítomnou krizí a jednak obecně menším zájmem návštěvníků i vystavovatelů o veletrhy mimo průmyslově zaměřené Německo. Na veletrhu byly zaznamenány pouze tři firmy, které si zaslouží pozornost v oblasti měření přesnosti obráběcích strojů. Prvním vystavovatelem je americká firma Hamar se svým systémem pro ustavování strojů Hamar Laser, který byl představen již na EMO 2005. Druhým zajímavým vystavovatelem je firma Etalon AG, která představila poměrně převratnou novinku mezi interferometrickými měřidly - Laser Tracer. Od firmy Renishaw měl světovou premiéru vylepšený systém pro měření kruhové interpolace - QC20-W.

4.1 Hamar Laser pro ustavení strojů a měření jejich geometrických vlastností



Obr. 6: Triple Scan® laserová hlava.

Jeden ze dvou zajímavých přístrojů představuje měřící souprava Hamar Laser od stejnojmenné firmy Hamar Laser. Tento systém je velmi univerzální. Dovoluje měřit mnoho geometrických parametrů stejně tak, jako je možné pomocí tohoto systému ustavovat stroje. Není náhodou, že tento systém bude uveden jako etalon v připravované revizi normy ISO 230-1. Princip využití laseru spočívá v patentovaném systému emise laserového paprsku pomocí neustále rotujícího optického hranolu. Tím je zaručen pohyb paprsku v ustavené rovině a zároveň pokrývá celou tuto rovinu až do vzdálenosti maximálního dosahu paprsku. Ten po opuštění zdrojové hlavy dopadá na cílovou plochu, tvořenou citlivou vrstvou s vysokým rozlišením (zvanou "target"). Paprsek se tedy nevrací zpět do vyzařovací hlavy. Vzhledem k neustálé rotaci paprsků a vyhodnocování odchylky dopadajícího paprsku na target v reálném čase, je tento nástroj velmi vhodný pro ustavování strojů. Každá změna nastavení geometrie stroje je

ihned zaznamenána a vyhodnocena.

Velkou výhodou tohoto měřidla je jeho modulárnost. V základní verzi je sestava nabízena s jedním rotujícím paprskem a třemi targety. Touto sestavou je možné měřit například rovinnost sledované plochy. Na opačném konci žebříčku vybavenosti je Triple Scan® laserová hlava. Tato hlava je unikátní v tom, že je osazena třemi rotujícími paprsky. Generovaný paprsek je pomocí speciálního pentaprismatického optického hranolu rozdělen a vyzařuje ve třech rovinách, které svírají vzájemný úhel přesně 90°. Tento efekt tvoří základní kámen vysoké hodnoty celého systému. Díky tomu je možné analyzovat kolmost mezi sledovanými rovinami na stroji na jedno upnutí laserové hlavy. Dosah paprsku pro relevantní měření je 30,5 m. Laserovou hlavu je možné umístit nejen přímo na stroj, ale také mimo konstrukci na stavitelnou trojnožku.

Targety jsou vybaveny bezdrátovým přenosem dat, odpadá tedy nepříjemný jev množství kabelů, zejména při pohybu částí stroje. Data mohou být stažena do přenosného PDA nebo do měřícího softwaru v počítači. PDA dovoluje zobrazit naráz hodnoty z až 4 targetů. Receiver pro počítač je pak schopen stáhnout naráz údaje z 99 targetů a předat je ke zpracování. Drobnou nevýhodou přenosu dat se ve světle dnešní konkurence jeví využití rádiového přenosu, i když je možné si

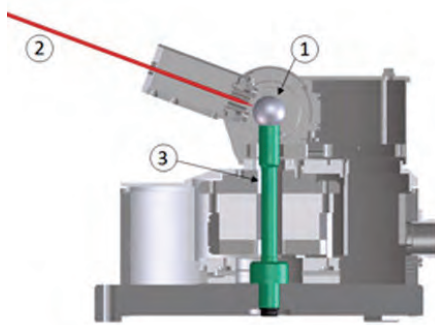


Obr. 7: Hamar Laser. Laserová hlava na stojánku (vlevo) a Target (vpravo).

vybrat mezi frekvencí 900 MHz a 2,4 GHz. Vzhledem k jednotnému mezinárodně definovanému standardu dnes výrobci měřidel přechází více k využití přenosu signálu přes Bluetooth.

Velmi výhodným efektem celého měřícího postupu je poměrně výrazná úspora času pro analýzu geometrie stroje. Výrobce uvádí čas 90 minut pro kompletní analýzu geometrie 3-osého stroje.

4.2 LaserTracer - řádivý posun v měření přesnosti obráběcích strojů



Obr. 8: Řez natáčení hlavou.

Německá firma Etalon AG představila velmi zajímavou novinku. Tou je LaserTRACER (neplést s laser tracker) pro kalibraci strojů i CMM. Lze provádět testy polohování a měření geometrických veličin stroje. Vše v současné době pro lineární i rotační osy.

V principu jde o laserový interferometr, který dokáže automaticky sledovat zacílený odražeč paprsku i při jeho obecném pohybu v prostoru. Základním principem přístroje je unikátní konstrukce natáčecí hlavy, ze které vychází laserový paprsek. Hlava se otáčí v patentovaném mechanismu, jehož základ tvoří velmi přesná referenční koule s odchylkou od ideální koule menší než 50 nm. Paprsek po opuštění hlavy dopadá na odražeč, tvořený dvěma kulovými povrchy. Tím je dosaženo velmi velkého zorného úhlu. Po odrazu dopadá paprsek zpět do natáčecí hlavy, kde je rozdělen na

dvě části. Každá část dopadá do vlastního kamerového systému, kde je paprsek zpracován. Díky tomuto systému spolu s vysokou tepelnou stabilitou je dosaženo přibližně o řád vyšší přesnosti určení polohy, než je tomu u stávajících laser trackerů. Pro ilustraci je zde uvedena nejistota změřeného výsledku:

$$U_{95} = 0,2\mu\text{m} + 0,3\mu\text{m}/\text{m}$$

Díky takto vysoké přesnosti se jedná o pravděpodobně nejpřesnější přístroj současnosti pro komplexní kalibraci strojů a CMM. Technické podrobnosti o pohonech hlavy, zpracování paprsku a konstrukci obražece jsou přísně chráněny.

Takto vysoce přesných výsledků je dosaženo mimo jiné sofistikovaným řešením pro tepelnou stabilizaci celé rotační hlavy. Narozdíl od laser trackerů, kde je zdroj laserového paprsku umístěn přímo v hlavě, je zde použito řešení s externím zdrojem. Paprsek je generován mimo vlastní hlavu, do které je poté přiveden optickým vláknem. Nedochází tak k tepelné deformaci vlastní měřicí hlavy a jejich měřících a pohonných prvků díky generování paprsku. Proto je spolu s další, již klasickou, kompenzací teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu v měřeném prostoru, možné dosáhnout prezentovaných výsledků.

Systém je neustále vyvíjen a jsou implementovány další funkce. Na EMO 2009 byla představena druhá vývojová varianta s vylepšenou optikou v natáčení hlavě a zejména došlo k výrazné úpravě odražeče paprsku. Původní hmotnost odražeče 360 g byla zredukována na pouhých 60 g a zároveň došlo ke zmenšení celého prvku o jednu třetinu. Při těchto parametrech již nemusí být brát velký zřetel na ovlivnění geometrie stroje instalací odražeče. Zejména u subtilních CMM. Současný dosah měřícího paprsku je 15 metrů. Hlavu je možné upevnit přímo na pracovní stůl, nebo využít tepelně stabilní trojnožky z uhlíkového kompozitu pro umístění mimo stroj.



Obr. 9: Systém LaserTRACER.

Velkou výhodou těchto systémů je to, že není nutné přístroj ustavit naprosto přesně před začátkem měření. Díky matematickým algoritmům a neustálému sledování odražeče hlavou je nepřesnost počátečního nastavení při vyhodnocování parametrů potlačena.

4.3 QC20-W - nová vylepšení měření kruhové interpolace

Posledním zajímavým přístrojem bylo představení horké novinky od firmy Renishaw. Jde o podstatně vylepšení již letitého a velmi populárního měřidla Ballbar QC10 pro měření kruhové interpolace.

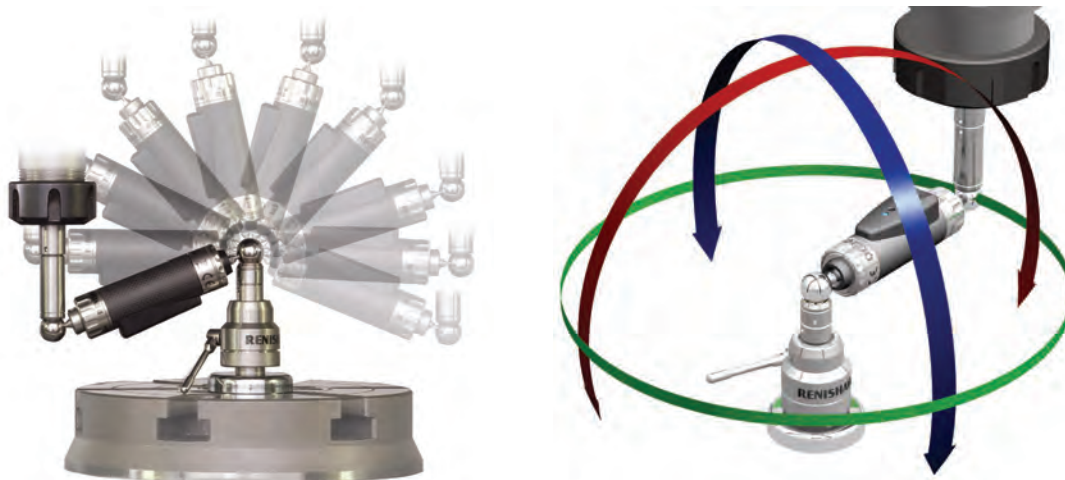


Obr. 10: Měřící rameno z Bluetooth adaptérem pro bezdrátový přenos dat.

zamotání kabelu během měření, což mohlo negativně ovlivnit výsledek, pokud by se kabel namotal na měřící ramínko, což byl poměrně častý jev. Dále již nehrozí nebezpečí zapadení kabelu mezi pohybující se části stroje. Tam hrozilo jeho fatální mechanické poškození. Zároveň toto řešení přináší výhodu v tom, že již nemusí být počítač s potřebným softwarem blízko místa měření. Garantovaný dosah přenosu dat je 10 metrů i skrze kryty stroje.

Druhu výraznou změnou je implementace nové vyhodnocovací funkce. Stávající klasická měření byla rozšířena o nová volumetrická měření. Díky modifikované magnetické základně je teď možné provést měření ve všech třech rovinách při jednom upnutí základny. Základní rovina je změřena v celém rozsahu 360°. Další dvě ortogonální roviny lze změřit v rozsahu přibližně 220°. Jsou tak postihnuty i chyby na kvadrantových přechodech těchto rovin. Díky jednomu upnutí základny je ze zjištěného souboru dat provedena volumetrická analýza stroje. Výsledkem je číselné vyhodnocení minima a maxima kulovitosti v měřené části pracovního prostoru.

Že jde o velmi očekávaná vylepšení značí i fakt, že po uvedení na trh byla téměř okamžitě vyčerpána výrobní kapacita na rok dopředu.



Obr. 11: Nové měřící schopnosti aparatury Renishaw Ballbar QC20-W.

5 Závěr

Jak již bylo řečeno v úvodu, veletrh EMO 2009 Milano nebyl z pohledu měřicí techniky příliš přínosný. V porovnání s předchozími ročníky byl zaznamenán znatelný úbytek vystavovatelů. Předváděné přístroje byly z části již známé a nových výrobků bylo poměrně málo. I tak ale byla představena některá měřidla, která posunula kvalitu měření dále. To se týká například uvedených zařízení pro měření přesnosti obráběcích strojů. Ucelený souhrn poznatků o aktuálním stavu měřicí techniky si však lze udělat pouze obtížně, protože mnoho významných firem nebylo přítomno.