

# Umerjanje in preverjanje geometrijske natančnosti računalniško krmiljenih obdelovalnih strojev

## Calibration and Checking the Geometrical Accuracy of a CNC Machine-Tool

Marko Cedilnik - Mirko Soković - Jože Jurkovič  
(Fakulteta za strojništvo, Ljubljana)

*Nenehen razvoj računalniške opreme je v postopek nastajanja izdelkov vnesel ostre zahteve po izmerni primernosti izdelkov. Natančni izdelki namreč kažejo na geometrijsko natančnost računalniško krmiljenega (RK) obdelovalnega stroja. Hitro preverjanje geometrijske natančnosti strojev poteka z uporabo naprave Ballbar QC10, natančno umerjanje oz. popravo parametrov v krmilniku pa poteka na podlagi rezultatov meritev natančne laserske naprave ML10. V prispevku je prikazano osnovno načelo delovanja naprave Ballbar QC10. Nekateri parametri, ki neposredno vplivajo na natančnost RK obdelovalnega stroja, pa so tudi natančneje opisani.*

© 2006 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: natančnost geometrijska, RK obdelovalni stroji, analize preizkušanja)**

*Constant computer-hardware and software developments have resulted in enhanced requirements for the dimensional accuracy of products. An accurate product reflects the geometrical accuracy of the CNC machine-tool. A quick accuracy test of a CNC machine-tool can be performed with the Ballbar QC10 device; calibration and parameter correction on the CNC controller can be done with a test-result analysis from the very accurate ML10 laser device. In this paper a brief overview of the working principles of the Ballbar QC10 device is presented. Some of the parameters that are directly related to the accuracy level of the CNC machine-tool are described in detail.*

© 2006 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: geometrical accuracy, CNC machine-tool, test analysis)**

### 0 UVOD

Zahteve po natančni izdelavi se vedno bolj povečujejo. Velike zahteve po natančnih izdelkih na eni strani "vrtijo kolo" razvoja računalniške in programske opreme, na drugi strani pa se nenehno povečuje natančnost strojev in orodij uporabljenih v postopku. Natančnost izdelkov je namreč neposredno povezana s sposobnostmi strojev uporabljenih v postopku. Smotrna proizvodnja v modernem podjetju in konkurenčni izdelki zahtevajo spremljanje in preverjanje natančnosti strojev. Geometrijska natančnost strojev je zato lahko podlaga za njihovo razvrščanje glede na zmožnosti. Na tak način se lahko zmanjša neobratovalni čas stroja, izmeček oz. izmerno neustrezne izdelke, obenem pa se s tem podaljša uporabna doba stroja. Izmerno nezahtevne izdelke lahko izdelujemo na zanje primernih strojih.

Po drugi strani lahko redna preverjanja natančnosti stroja in spremljanje velikosti odstopanj

### 0 INTRODUCTION

The accuracy requirements of machined products are constantly increasing. High standards for accurate products "spin the wheel" of constant computer software and hardware development, on the one hand, and accuracy improvements to machines and tools used in the process, on the other. The accuracy level of machined products is directly related to the performance of the machine(s) used in the production line. Competitive products and an effective production line in modern enterprises demand constant checking of machine-tool performance. Thus, the geometrical accuracy of CNC machine-tools can be the basis for rating CNC machine-tools according to their performance. With these measures machine downtime and scrap can be minimized, and at the same time the life-cycle of the machine-tools can be prolonged. Simple parts can, however, be machined on relatively inaccurate machines.

On the other hand, regular check-ups and the accompanying size of errors can dictate the

narekujejo redna ali preprečevalna vzdrževalna dela, s čimer lahko še dodatno vplivamo na podaljšanje uporabne dobe obdelovalnega stroja ([1] do [5]).

## 1 NAPRAVA BALLBAR QC10

Zelo uspešna metoda za hitro ugotavljanje geometrijske natančnosti stroja temelji na krožnem testu z napravo Ballbar QC10, izdelovalca Renishaw iz Velike Britanije (sl. 1). Naprava Ballbar QC10 se uporablja za kratke 10-minutne teste geometrijske natančnosti obdelovalnih strojev. Osrčje naprave je induktivno dolžinsko zaznavalo (IDZ - LVDT), ki je postavljeno med dve jekleni kroglici ( $\varnothing = 12,7 \text{ mm} \pm 2,5 \mu\text{m}$ ) na vsakem koncu merilne palice. To se postavi v magnetna sedeža, ki ju pritrdimo na obdelovalno mizo (A) oz. vpremo v vreteno stroja (B) (sl. 1). Prek serijskih vrat RS232 (COM) je IDZ povezano z računalnikom in ustreznim programom, ki med izvajanjem krožnega testa zajema majhne prečne pomike ene kroglice glede na drugo. Glede na omejitve in različne tipe obdelovalnih strojev lahko naredimo različne teste: krožne ( $360^\circ$ ), polkrožne ( $180^\circ$ ) ali četrtsinske ( $90^\circ$ ) v ravninah XY, XZ in YZ ([1] in [6]).

Glede na vrsto in smer testa je treba napisati računalniški program, ki je zapis programirane idealne krožne poti vretena B okoli središča kroglice A. Polmer krožnega testa je mogoče prilagajati za različne velikosti obdelovalnih strojev. Osnovni polmer

regular or preventive maintenance of the machine parts, which again contributes to the extension of the machine-tool life-cycle time ([1] to [5]).

## 1 THE BALLBAR QC10 DEVICE

A very successful method for a quick check of the geometrical accuracy of a CNC machine-tool is based on a circular test with the Ballbar QC10 (QC10 - Quick Check 10 min) device from the Renishaw company in the UK, Fig.1. The Ballbar QC 10 device is used for a brief test to determine the geometrical accuracy of the machine. The Ballbar device consists of an LVDT (linear variable differential transformer) sensor, which is placed between two accurate steel balls ( $\varnothing = 12.7 \text{ mm} \pm 2.5 \mu\text{m}$ ) at each end of the bar. With two magnetic mounts the Ballbar is set-up on the machine bed (A) and in the spindle (B), Fig.1. Through an RS 232 port (COM), the LVDT sensor is connected with the computer and suitable software, which detect radial movements of one steel ball relative to the other, during a circular test. According to the limits of each machine and the different types of machines, various tests can be made: circular ( $360^\circ$ ), half-circular ( $180^\circ$ ) or one quarter of a circle test ( $90^\circ$ ) in the XY, XZ in YZ planes ([1] and [6]).

According to the type of test, an NC program should be written, which presents a record of the ideal circular path of the spindle B around the center of the steel ball A. The Ballbar radius can be adapted according to the size of the CNC machine-

Preglednica 1. Podrobni popis naprave Ballbar QC10  
Table 1. System specification of the Ballbar QC10 device

ločljivost resolution	0,1 $\mu\text{m}$
natančnost induktivnega dolžinskega zaznavala LVDT sensor accuracy	$\pm 0,5 \mu\text{m}$ (pri/at $20^\circ\text{C}$ )
najv. število zajetih podatkov max. sample rate	250 /s
imenska dolžina Ballbar naprave ( $\pm$ najv. pomik) Ballbar length ( $\pm$ max. move)	100 mm (med jeklenima kroglama/ between steel balls) (-1,25 mm to/do +1,75 mm)
podaljški merilne palice extension bars	50 mm, 150 mm, 300 mm
temp. območje delovanja operating temperature range	0 do/to $40^\circ\text{C}$
natančnost umerjanja na stekleni plošči Zerodur (pri $20^\circ\text{C}$ ) calibrator accuracies Zerodur-plate (at $20^\circ\text{C}$ )	$\pm 0,1 \mu\text{m}$ (za/for 100 mm) $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (za/for 150 mm) $\pm 0,15 \mu\text{m}$ (za/for 300 mm)
poraba energije energy consumption	50 mA / 9V DC



Sl. 1. Naprava Ballbar QC10

Fig. 1. Ballbar QC10 device

Ballbar naprave je 100 mm, s podaljškami pa je mogoče polmer povečati na 150, 300 oz. 600 mm. Če izvajamo polni krožni test ( $360^\circ$ ), je ta sestavljen iz dveh delov meritev:

- dve zavrtitvi vretena okoli središča kroglice A v *proti urni smeri*,
- dve zavrtitvi vretena okoli središča kroglice A v *urni smeri*.

Med menjavo smeri, zaradi pravilnega zajemanja podatkov, upoštevamo najmanj 3-sekundni premor. Tudi pri polkrožnem ali četrtinskem testu izvajamo gibanje v obe smeri. Med izvajanjem testa, računalnik prikazuje in zapisuje odstopanja dejanske poti vretena od idealne krožnice, ki je zapisana s programom.

Natančnost naprave Ballbar in plošče Zerodur (ki je del celote) je podana in overjena od izdelovalca naprave, podjetja Renishaw. Glede na temperaturo okolice in stroja z RK, se pred vsakim testom izvede temperaturno umerjanje naprave Ballbar. Temperaturno umerjanje se izvede na plošči Zerodur, ki ima zanemarljiv temperaturni razteznostni koeficient  $\alpha$  v celotnem temperaturnem območju delovanja naprave Ballbar (pregl. 1).

Rezultati testa so prikazani in ovrednoteni grafično in preglednično in so skladni s standardi ISO 320-1, ANSI B5.54 in B5.57 ter JIS B6194 (sl. 5). Nekateri odstopki, so glede na velikost odstopanja in tudi glede na ostale odstopke, predstavljeni kot deleži od skupnega odstopanja na RK stroju. Velikost

tool. The basic radius of the Ballbar is 100 mm, but it can be extended with additional bars to 150, 300 or 600 mm. In the case of the circular ( $360^\circ$ ) test, the measurement is a combination of two movements:

- two rounds of the spindle around the center steel ball A in a *counter-clockwise* direction,
- two rounds of the spindle around the center steel ball A in a *clockwise* direction.

For an accurate measurement, at least 3 seconds should pass between changes of direction. The measurement consists of two movements of the Ballbar sensor in the half circular ( $180^\circ$ ) and the one quarter of a circle test ( $90^\circ$ ). During the test the computer shows and writes errors, which is the difference between the actual path of the spindle against the ideal path written in the NC program.

The accuracy of the Ballbar sensor and the Zerodur plate (which is in a kit) is stated and certified by the producer, i.e., Renishaw. Considering the working and surrounding temperature of the CNC machine-tool, the temperature calibration of the Ballbar device should be made before any test. The temperature calibration is made on the Zerodur plate, which has a very low temperature coefficient of extension,  $\alpha$ , in the range of the Ballbar device's working temperature, Table 1.

The test results are presented and evaluated in graphical and tabular modes, and are in compliance with the ISO 320-1, ANSI B5.54, B5.57 and JIS B6194 standards, Fig. 5. Some errors are, according to their magnitude and in comparison to the other errors,

posameznega odstopka ni neposredno povezana z geometrijsko natančnostjo RK stroja, temveč je povezava le posredno določena. Rezultate testa je s programom za pomoč mogoče razčleniti na več kot 20 različnih virov odstopanj. Prevladujoča oblika krožnega zapisa se navadno zelo hitro opazi in ima največji vpliv na geometrijsko nenatančnost RK stroja. Natančna razlaga preostalih manj vplivnih odstopanj in povezava z mogočimi vzroki zanje je po navadi zelo zahtevno delo, saj zahteva že kar nekaj izkušenj ter znanja o natančni zgradbi posameznih modulov RK stroja in njihovem delovanju. Pomoč pri razlagi rezultatov meritev nedvomno ponuja že omenjen program za pomoč, v katerem so za vsak značilni krožni zapis v grobem navedene neposredne posledice posameznih odstopanj in priporočila za njihovo zmanjšanje ali odpravo.

Programski paket, ki je dodan merilni napravi, shrani vsak test posebej, kar omogoča, da lahko v daljšem časovnem obdobju spremljamo spreminjanje vsakega posameznega parametra na RK stroju. Takšno spremljanje parametrov posledično narekuje potrebna vzdrževalna dela na stroju, s čimer se podaljša uporabna doba obdelovalnega stroja ([1] in [6]).

Zelo pomemben del programskega paketa Ballbar je t.i. simulator Ballbar, ki omogoča simuliranje fizičnih nastavitvev obdelovalnega stroja in parametrov v krmilniku stroja. S takšno simulacijo lahko enostavno določimo vsak posamezen parameter, ki mora biti popravljen in za koliko morajo biti vrednosti drugačne, da se z najmanjšimi stroški in v čim krajšem času geometrijska natančnost RK stroja izboljša. Soodvisnost parametrov lahko včasih zamegli glavno težavo, ki vpliva na geometrijsko nenatančnost RK stroja [6].

### 1.1 Teorija merjenja z napravo Ballbar

Pri vsaki meritvi ali gibanju po poti se pojavijo odstopki. Odstopanja so posledica merilne negotovosti elementov v sistemu. Idealnih sistemov ni, kakor tudi ne idealnih RK strojev.

Središče kroglice, vpete v magnetni sedež A na obdelovalni mizi (sl. 1), je izhodiščna točka (0,0,0) v opazovanem primeru. Kroglica, ki kroži (B) pa ima v določenem časovnem trenutku ( $t_1$ ) koordinate B (X,Y,Z) (sl. 3). R pomeni razdaljo med točkama A in B v opazovanem časovnem trenutku  $t_1$ . Sledi:

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (1).$$

presented as a share of the total deviation on the CNC machine-tool. The magnitude of the error is not directly related to the general accuracy of the CNC machine-tool; however, there is an indirect connection. Test results can be classified with the "Help" program into 20 possible sources of errors. The prevailing test error is usually very noticeable, and has a relatively high impact on the general non-accuracy of the CNC machine-tool. The interpretation of other less-significant errors and related causes for it can be a very demanding task, which requires some extra knowledge of CNC machine-tool modules and their working principles. The above-mentioned Help program also offers assistance to determine the real cause of each error's origin and includes a recommendation to minimize or nullify a particular error.

Software embedded in the Ballbar device also keeps a record of each measurement, thus information about each parameter of the CNC machine-tool can be analyzed over the long term. Such activities dictate regular or preventive maintenance of the machine parts, which contributes to the extension of the machine-tool life-cycle.

A very important part of the Ballbar software is the Ballbar simulator, which can be used for a simulation of the physical corrections on CNC machine-tool modules as well as parameter corrections in the machine controller. With such a simulation we can easily determine which and for how much each parameter should be corrected in order to get as accurate a CNC machine-tool as possible, with minimum corrections and with minimal time and costs. Indirect interrelations among several parameters can sometimes "fog" the real cause of CNC machine-tool errors ([1] and [6]).

### 1.1 The Ballbar measuring theory

Errors originate from measurements or path movements. Root causes of the errors are related to the measurement uncertainty of the elements in the system. There are no ideal systems, as well as there is no ideal CNC machine-tool.

The center of the steel ball (A) placed on the machine bed (Fig. 1) can be set as the origin point (0,0,0) in our coordinate system. Moving the steel ball (B), which circulates around the origin point, has in time ( $t_1$ ) position B (X,Y,Z), Fig 2. R is the distance between the points A and B in the time  $t_1$ . Thus:

Ko se vreteno premakne na lego B (X,Y,Z), se orodje zaradi odstopkov pravzaprav premakne v lego B'' (X'',Y'',Z'') (sl. 2). Zaradi tega lahko napako lege izrazimo takole:

$$\begin{aligned} \vec{C} &= (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \\ \Delta X &= X'' - X \\ \Delta Y &= Y'' - Y \\ \Delta Z &= Z'' - Z \end{aligned} \tag{2}$$

Če vektor C upoštevamo v enačbi (1), dobimo:

$$(R + \Delta R)^2 = (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \tag{3}$$

Če še upoštevamo enakost iz enačbe (1) in zanemarimo kvadratne člene odstopkov iz enačbe (4), dobimo enačbo (6):

$$R^2 + 2 \cdot \Delta R \cdot R = X^2 + Y^2 + Z^2 + 2 \cdot (X \cdot \Delta X + Y \cdot \Delta Y + Z \cdot \Delta Z) \tag{4}$$

$$\Delta R = R'' - R \tag{5}$$

$$\Delta R = \frac{1}{R} \cdot (X \cdot \Delta X + Y \cdot \Delta Y + Z \cdot \Delta Z) \tag{6}$$

kjer je ΔR skupni odstopok v smeri polmera R. Enačba (6) daje odvisnost napake lege vretena B'' in izmerjenih podatkov z uporabo naprave Ballbar QC10 [2].

When the spindle is moved to a point B (X,Y,Z), the real position of the spindle with an error will be B'' (X'',Y'',Z''), Fig. 2. Therefore, the positioning error of the spindle can be expressed as follows:

If vector C is entered into Equation (1), we obtain :

Considering Equation (1) and neglecting the squared error elements from Equation (4), we obtain Equation (6):

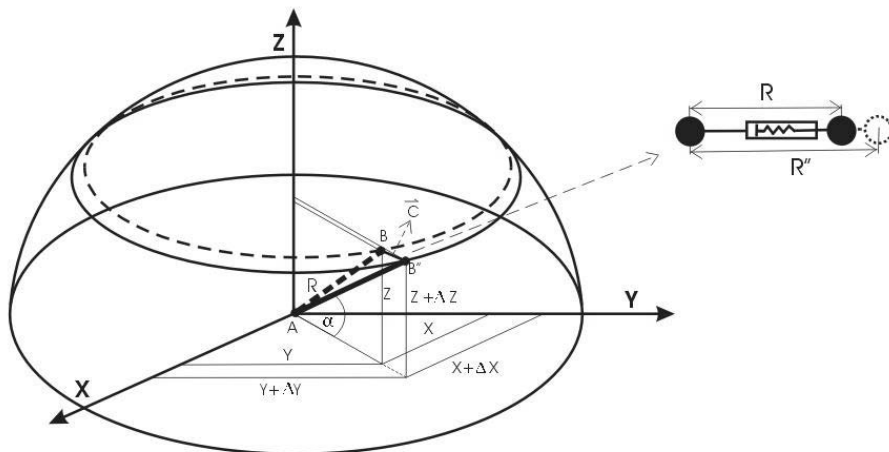
where ΔR is the length error along the radius R direction. Equation (6) shows the relation between the positioning error vector of the spindle B'' and the measuring data using the Ballbar QC10 device [2].

## 2 LASERSKA NAPRAVA ML10

Laserski sistem ML10 Gold Standard je drugi način za vrhunsko preverjanje in umerjanje natančnosti obdelovalnih strojev ter tudi koordinatnih merilnih strojev (KMS - CMM). Z veliko

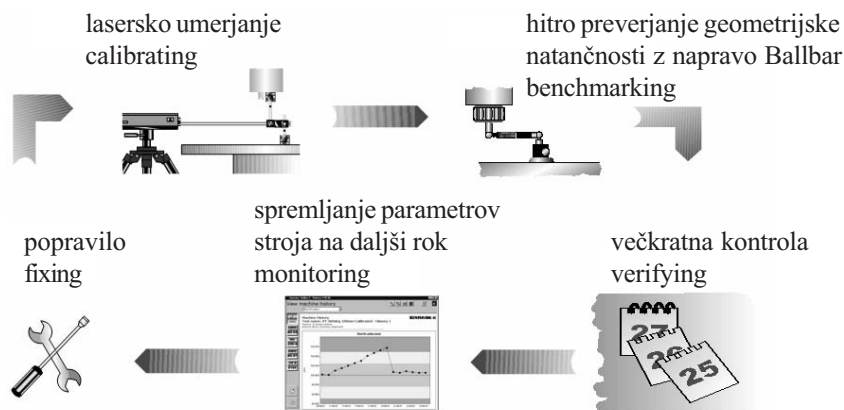
## 2 THE ML10 LASER SYSTEM

The ML10 Gold Standard laser system represents the second mode for top-level identification and the compensation of errors on CNC machine-tools and coordinate-measuring machines (CMM). With the



Sl. 2. Izmerjena krožnica in idealna krožna pot naprave Ballbar pri kotu merilne palice α [°]  
Fig. 2. Measuring circle and ideal circular path of the Ballbar device with a tilting angle α [°]





Sl. 3. Zaporedje aktivnosti za določanje geometrijske natančnosti RK stroja  
 Fig. 3. Sequence of actions to determine the geometrical accuracy of the CNC machine-tool

natančnostjo laserskega vira lahko z nanometrsko ločljivostjo merimo velikost napak oz. odstopanj. S posebnimi pripomočki in z dodatnimi optičnimi elementi v merilni verigi lahko merimo: premi pomik, kotne zasuke, ravnosti, pravokotnosti, ploskovnosti, vrtenje osi itn.

Obe napravi (Ballbar QC10 in laserska naprava ML10) se lahko uporabljata za preverjanje geometrijske natančnosti RK strojev. Najboljša je vzajemna uporaba obeh naprav, kakor je prikazano na sliki 3. Na sliki je prikazano zaporedje dejavnosti pri preverjanju geometrijske natančnosti RK stroja. V tem primeru je laserska naprava uporabljena za umerjanje po večjih mehanskih posegih na RK stroju, med tem ko se naprava Ballbar QC10 uporablja za hitre in redne preglede natančnosti RK stroja. Takšna uporaba naprav lahko narekuje redna ali preprečevalna vzdrževalna dela na elementih, vgrajenih v RK stroj ([7] do [9]).

### 3 RAZVRŠČANJE ODSTOPKOV/NAPAK

Vzroke za nenatančnost obdelovalnih strojev je mogoče iskati v več kot 20 različnih virih odstopanj. Odstopanja lahko razdelimo v dve glavni skupini, in sicer glede na vzrok za njihov nastanek:

- Odstopanja od lege
  - geometrične odstopke
  - odstopanja na položajnih elementih
- Odstopanja zaradi gibanja (podajanja)

Vektor, ki označuje odstopanje od lege je odvisen od elementov v vodilih delovne mize, delovni mizi in vretenu. Odstopke, ki povzročajo odstopanje od položaja, lahko razdelimo v dve skupini: na

high accuracy of a laser beam, nanometric measurements can be executed. With special equipment and additional optical devices, several measurements on the CNC machine-tool can be performed: linear accuracy, angular pitch, straightness measurement, squareness measurement, flatness measurement, rotary-axes measurement, etc.

Both devices (the Ballbar QC10 and the ML10 laser system) can be used for accuracy identification of the CNC machine-tools. The best solution is the combined use of both devices, shown in Fig. 3. The figure presents the sequential actions to determine the geometrical accuracy of the CNC machine-tools. In this case the laser system is used for a calibration after a major mechanical intervention on the CNC machine-tool, in contrast the Ballbar QC10 device, which is used for quick and frequent check-ups of the accuracy of the CNC machine-tool. Such activities could dictate regular or preventive maintenance of the CNC machine-tool parts ([7] to [9]).

### 3 ERROR CLASSIFICATION

Causes for the non-accuracy of the CNC machine-tools can be classified into more than 20 possible sources. Motion errors and their origins can be divided into the following two groups:

- Position-dependent errors
  - geometrical errors
  - errors of the positioning system
- Feed-motion-dependent errors

The error vector of the position-dependent error is defined only by the sliders, the table and the saddle. The position-dependent error can be classified into two groups: the geometrical error of

geometrijske odstopke in na odstopke zaradi nenatančnosti položajnih elementov. Geometrijski odstopki na stroju so posledica nenatančnosti vodil na delovni mizi, in sicer nepopolne medsebojne pravokotnosti med osema, odstopanja od ravnosti vodil ter nelinearnega (kotnega zasuka) gibanja drsnika.

Nenatančnost položajnih elementov obsega odstopke v natančnosti lestvice oz. pogonskega sklopa na krogelnih vretenih, odstopanja detektorja kotnih zasukov, napako lestvice, nepravilno izravnavo prostega giba in nepravilno izravnavo razdalje med dvema zajetima točkama. V primeru izravnave prostega giba, je vrednost vedno enaka, spreminja se le predznak, ki je odvisen od smeri gibanja.

Na drugi strani pa odstopanja zaradi gibanja (podajanja) vključujejo odstopke zaradi podajanja, lepljenja, zdrsnega učinka ter odstopke na povratni zvezi določanja natančne lege. Velikost odstopkov je v teh primerih vedno nespremenljiva ([10] in [11]).

#### 4 TEST BALLBAR NA STROJU CNC

Test z napravo QC10 je bil izveden na 3-osnem, navpičnem RK-frezalnem stroju Mori Seiki Frontier M1 v Laboratoriju za odrezovanje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Po nekaj predhodnih testih je bil narejen polni krožni test ( $360^\circ$ ) v ravnini XY. Zaradi večje natančnosti rezultatov je bil krožni test (ki zagotavlja tudi najboljšo "sliko" o natančnosti stroja) izveden na dveh legah na obdelovalni mizi (v ravnini XY) in pri dveh višinah ( $z_1 = 0$  mm in  $z_2 = 200$  mm) (sl. 4). Temperatura okolice je bila med izvajanjem testa nespremenjena ( $24^\circ\text{C}$ ), kar smo upoštevali pri temperaturnem umerjanju naprave Ballbar QC10 pred izvajanjem testa. V preglednici 2 in na sliki 5 so podani značilni odstopki, ki v veliki meri vplivajo na rezultate

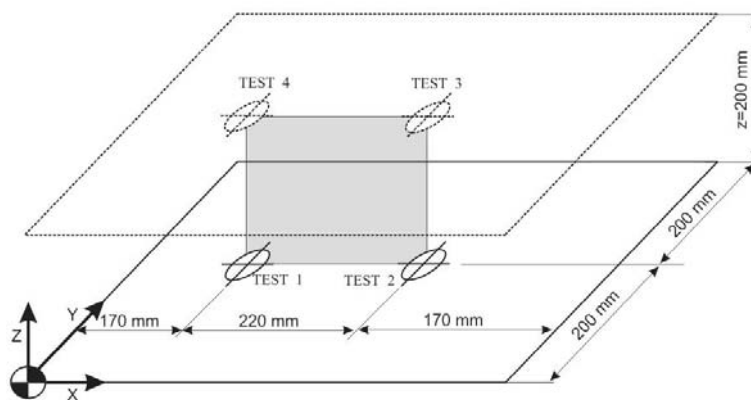
the machine-tool and the error of the positioning system. The machine's geometrical errors are caused by the guide way, such as the squareness error between two rectangular axes, the straightness error of the guide way and the angular motion of the slider.

The error of the positioning system consists of the error of the positioning scale or a ball screw driving system, the misalignment of the angle detector, the error of the position scale, the backlash compensation and the pitch-error compensation. In the case of the backlash compensation, the value is always constant, though the sign – plus or minus – may differ according to the feed direction.

On the other hand, the feed-motion-dependent error includes errors caused mainly by feed-rate, stick motion, slick slip, and mismatching of the position-loop gain. The amounts of these four types of errors are always constant ([10] and [11]).

#### 4 BALLBAR TEST ON A CNC MACHINE-TOOL

The Ballbar test was made on a Mori Seiki Frontier M 3-axis vertical CNC machine-tool, used in the Laboratory for Cutting, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia. After a few experimental Ballbar tests on the CNC machine-tool, a circular ( $360^\circ$ ) test on the XY-plane was performed. Due to more accurate results, circular tests (which provide the best "picture" of the machine's accuracy) were made at two test positions on the machine bed and at two heights ( $z_1 = 0$  mm in  $z_2 = 200$  mm), Fig. 4. During the tests, the surrounding temperature was  $24^\circ\text{C}$ , which was taken into consideration before the test, when the temperature calibration of the Ballbar QC10 device was made. In Table 2 and Fig. 5, characteristic errors, which



Sl. 4. Lega jeklene kroglice A za posamezni test na RK stroju  
Fig. 4. Position of steel ball A for each test on the CNC machine-tool

Preglednica 2. Primerjava najpomembnejših podatkov iz poročil Ballbar  
 Table 2. Comparison of the most important data from the Ballbar reports

	obdelovalna miza ( $z_1 = 0$ mm) machine bed ( $z_1 = 0$ mm)		test na višini $z_2 = 200$ mm test on height $z_2 = 200$ mm	
	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4
<b>Kvadratnost [<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>]</b> <b>Squarness [<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>]</b>	<b>-46,6</b>	<b>-38,9</b>	<b>-64,2</b>	<b>-72,0</b>
<b>Neujemanje lestvice [<math>\mu\text{m}</math>]</b> <b>Scaling mismatch [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>-13,7</b>	<b>-13,3</b>	<b>0,6</b>	<b>-1,0</b>
<b>Najboljše ujemanje polmera [mm]</b> <b>Best fit radius [mm]</b>	<b>149,9915</b>	<b>149,9935</b>	<b>149,9965</b>	<b>149,9958</b>
Napaka lestvice X [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] Scaling error X [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-79,2	-65,6	-22,1	-29,6
Napaka lestvice Y [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] Scaling error Y [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-33,5	-21,2	-24,0	-26,3
Zamik središča X [ $\mu\text{m}$ ] Center offset X [ $\mu\text{m}$ ]	-25,6	-29,2	21,3	2,6
Zamik središča Y [ $\mu\text{m}$ ] Center offset Y [ $\mu\text{m}$ ]	4,9	22,2	-11,5	43,5
Napaka lege [ $\mu\text{m}$ ] Positional tolerance [ $\mu\text{m}$ ]	58,9	47,8	43,8	49,8
Zaostali vrhovi X [ $\mu\text{m}$ ] Reversal spikes X [ $\mu\text{m}$ ]	-18,6	-17,8	-19,3	-17,6
Zaostali vrhovi Y [ $\mu\text{m}$ ] Reversal spikes Y [ $\mu\text{m}$ ]	-6,7	-6,4	-5,9	-7,7
Krožnost [ $\mu\text{m}$ ] Circularity [ $\mu\text{m}$ ]	29,5	29,9	27,6	26,6

meritev. Ti rezultati so tudi osnova za nadaljnjo podrobnejšo analizo rezultatov meritev, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

#### 4.1 Analiza rezultatov testa Ballbar

Iz podatkov predstavljenih v preglednici 2 in na sliki 5, je mogoče izpostaviti naslednje odstopke:

- 1. Odstopke kvadratnosti**, ki neposredno opisuje pravokotnost vodil X in Y med seboj, kaže, da je kot med osema manjši od  $90^\circ$ , saj ima odstopke negativni predznak. Elipsa je prav tako nagnjena diagonalno za kot  $45^\circ$ . Iz testov lahko ugotovimo, da se odstopanje kvadratnosti povečuje z višino.
- 2. Napaka lestvice** označuje razliko med izmerjenimi potmi na oseh. Negativna vrednost opisuje prehitevanje osi Y glede na os X. V našem primeru os Y prehiteva os X, pri čemer je prehitevanje na obdelovalni mizi ( $z_1 = 0$  mm) izrazito večje kot na višini  $z_2 = 200$  mm, kjer se prehitevanje komaj opazi.
- 3. Najboljše ujemanje polmera** prikazuje najboljše ujemanje krožnice z zajetim krožnim podatkom. V

have a major influence on the test results, are presented. These results were also the basis for a detailed test analysis, presented later in the paper.

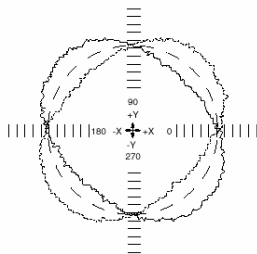
#### 4.1 Ballbar test analysis

From the data presented in Table 2, and from Fig. 5, the following errors can be exposed:

- 1. The squareness error** directly describes the perpendicular position between the X- and Y-axis sliders, shows that the angle between the axes is less than  $90^\circ$ , because the value is negative. The oval shape is also distorted along the  $45^\circ$  diagonal. From the test we can find that the squareness error increases with the height.
- 2. The scaling mismatch** error is the difference in the measured travels of the axes during the test. A negative value signifies that the Y-axis is over traveling the X-axis. In our case the Y-axis over traveled the X-axis; however, the over traveling on the machine bed ( $z_1 = 0$  mm) is far more extensive than at the height  $z_2 = 200$  mm, where the over traveling is hardly noticed.
- 3. The best-fit radius** is the best circle that passes through the captured data. In our case the best-fit

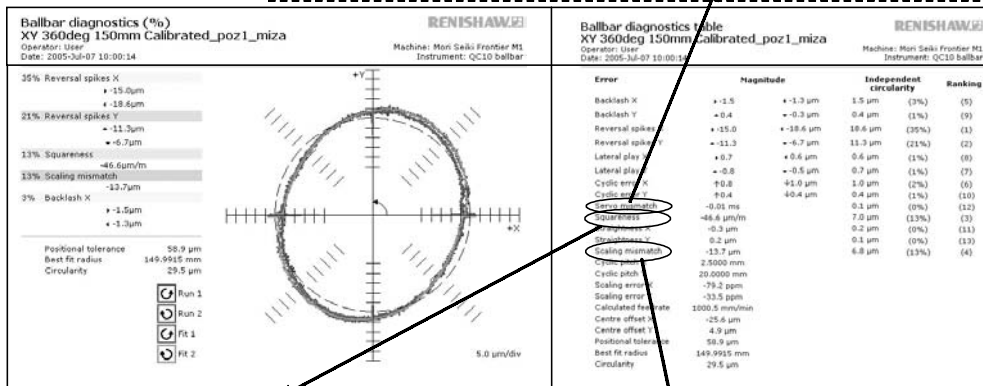


**Neujemanje podajanja servomotorjev / Servo mismatch**



Slika ima obliko jajca ali lešnika, pri čemer sta kroga na diagonalah pod kotom 45° ali 135°. Odvisno od proti- ali urnega gibanja je odvisna tudi lega kroga (elipse). Večje odstopanje je navadno tudi odvisno od večjega podajanja. Neujemanje podajanja servomotorjev je tesno povezano z odstopanjem kvadratnosti. Odstopanje je podano v časovnih enotah, pri čemer opisuje, za koliko podajanje servomotorja ene osi prehitava drugo os. Vrednost je lahko negativna oz. pozitivna, odvisno od smeri testa [6].

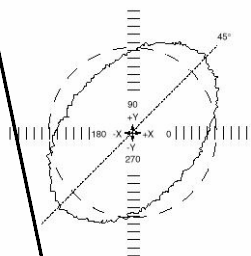
The plot has an oval or peanut shape, distorted along the 45° or 135° diagonal. The axis on which the plot is distorted switches if the feed changes from the clockwise direction to the counter-clockwise direction; both directions are shown on the plot. The amount of distortion usually increases with increasing feed-rate. This error is also connected to the squareness error. This value is the time in milliseconds by which one of the machines axis servos leads the other. The value is either positive or negative, depending on the axial direction of the test [6].



**Kvadratnost/ Squareness**

Slika ima obliko jajca ali lešnika. Oblika leži pod kotom 45° ali 135° pri protiturni in urni smeri vrtenja in je neodvisen od hitrosti podajanja. Odstopek kvadratnosti opisuje pravokotnost med vodiloma X in Y. Pozitivno odstopanje kvadratnosti označuje, da kot med vodiloma presega 90°. Negativna vrednost odstopanja kvadratnosti pa označuje kot, ki je manjši od 90° [6].

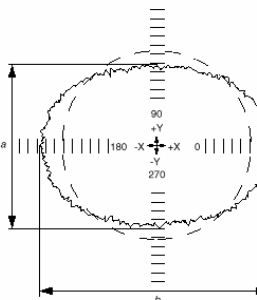
The plot has an oval or peanut shape, distorted along the 45° or 135° diagonal. The axis of distortion is the same for both clockwise and counter-clockwise directions, and is unaffected by feed-rate. The squareness error describes the perpendicular position between the X- and Y-axis slides. A positive squareness error indicates that the angle between the positive axes exceeds 90°. A negative squareness error (on a plot) indicates that the angle between the positive axes is less than 90° [6].



**Napaka lestvice / Scaling error (mismatch)**

Elipsa, ki nastane pri odstopanju lestvice, je lahko usmerjena v smeri 0° ali 90° in je neodvisna od smeri gibanja in navadno tudi neodvisna od podajanja. Napaka lestvice je razlika med opravljenjo potjo v eni smeri glede na drugo. Na primer, če izvajamo krožni test XY mora biti vzdolžni premik v smereh X in Y povsem enak. Natančnost meritve je zelo odvisna od umerjenosti naprave Ballbar in od pravilne temperaturne izravnave. Odstopanje je podano v µm [6].

An oval shape distorted along the 0° or 90° axis is caused by a scaling error, which is unaffected by the direction of data capture, i.e., clockwise or counter-clockwise or federate. The scaling error is the difference in the measured travels of the axes during the test. For example, if the machine is performing a circle in the XY plane, the X and Y axes should move over exactly the same distance. The accuracy of the scaling error results depends heavily on the correct calibration of the Ballbar and on the correct application of thermal compensation. The scaling error is given in µm [6].



Sl. 5. Rezultati testa na obdelovalni mizi ( $z_1 = 0$  mm, lega 1); grafični in preglednični prikaz  
Fig. 5. Test result on machine bed ( $z_1 = 0$  mm, position 1), graphical and tabular presentation

našem primeru se vrednost najboljšega ujemanja polmera povečuje z večanjem višine. To pomeni, da so vodila RK stroja v neobremenjen stanju izbočena.

Iz rezultatov testov je mogoče podati tudi natančnejšo oceno zmogljivosti RK stroja. Grobo sliko o geometrijski natančnosti stroja podajata prvi dve zgornji ugotovitvi. Na prvi pogled se odstopanja oz. združitve prve in druge ugotovitve izključujeta, toda natančnejša analiza pokaže zelo zanimiv rezultat. Druga ugotovitev, kot je bilo že omenjeno, označuje, da na obdelovalni mizi RK stroja os Y prehiteva os X. Na višini  $z_2 = 200$  mm se prehitevanje komaj opazi.

Če upoštevamo drugo, prvo in tretjo ugotovitev, lahko podamo precej jasen sklep. Prehitevanje osi Y na obdelovalni mizi ( $z_1$ ) je na višini  $z_2$  *izravnano* z nepravokotnostjo in ukrivljenostjo vodil. Iz rezultatov testov lahko sklepamo tudi, da je ukrivljenost vodila Y nekoliko večja kot je ukrivljenost vodila X. Ob teh ugotovitvah lahko podamo dokaj verjetno oceno, da bi dodatna obremenitev (masa) na obdelovalni mizi zmanjšala odstopanja na RK stroju, čeprav bi za dokončno potrditev te podmene morali narediti še kakšen dodaten test tudi pri različnih obremenitvah na obdelovalni mizi.

Najzahtevnejši del meritev z napravo Ballbar je analiza rezultatov. Zaradi velikega števila informacij, ki jih dobimo s testom je včasih težko razbrati vzroke za nenatančnost RK stroja. Za natančno analizo je potrebno pregledati in upoštevati vse podatke. Analiza mora upoštevati zgradbo in delovanje RK stroja. Zaradi tega analiza Ballbar zahteva človeka z izkušnjami pri uporabi naprave Ballbar in poznavanjem vseh mogočih odstopanj, ki se lahko pojavijo na RK stroju, kakor tudi dobro poznavanje njegovega delovanja.

## 5 SKLEP

V prispevku sta predstavljeni dve napravi Ballbar QC10 in laserski sistem ML10, s katerima lahko preverimo geometrijsko natančnost RK stroja. Najboljša je vzajemna uporaba obeh naprav. V tem primeru laserska naprava podaja absolutno natančne, a nekoliko počasno pridobljene meritve, za razliko od naprave Ballbar, ki poda hitre, a nekoliko manj točne rezultate o geometrijski natančnosti stroja. Pri analizi rezultatov iz testa Ballbar lahko nastanejo težave, toda laserska naprava ima tudi svoje pomanjkljivosti, še posebno pri ceni laserske opreme.

radius is getting larger with the increased height. Thus, the sliders in the unloaded situation have a convex shape on the CNC machine-tool.

From the test results, a more accurate evaluation of the performance of the CNC machine-tool can be made. A rough picture of the machine-tool accuracy is given in the first and second statements listed above. Although it seems that the first and second statements are contradictory, a closer look indicates a very interesting result. In statement 2 it was mentioned that the Y-axis over travels the X-axis on the machine bed. At height  $z_2 = 200$  mm the over traveling is hardly noticed.

Considering statement 2 and statement 1 and 3, an evident conclusion can be made. The Y-axis over traveling on the machine bed ( $z_1$ ) is, at the  $z_2$  height, *compensated* with the perpendicularity and the slides' convexity. From the test results it can also be concluded that the Y-slide is more bent than the X-axis slide. Thus, a very credible estimation can be given. The extra load on the machine bed should lower the inaccuracy of the CNC machine-tool, although some extra tests with different loadings should be made on the CNC machine-tool for a full confirmation of this statement.

The Ballbar test-result analysis is the most demanding part of the measurements. Due to a large amount of information from the test results, it is sometimes difficult to identify real sources of inaccuracy of the CNC machine-tool. For an accurate interpretation a cross-sectional look over all of the data should be considered. The analysis should always correspond to the machine structure and its working principles. Thus, the Ballbar test analysis requires a person with experiences of using the Ballbar device, knowing the possible origins of the errors and knowledge about the working principles of CNC machine-tools.

## 5 CONCLUSION

In the paper we present two devices – the Ballbar QC10 and the ML10 laser system – which can determine the accuracy of a CNC machine-tool. The best solution is the use of both devices. In this case the laser device presents absolutely accurate and slow measurements, in contrast to the Ballbar device, which gives quick and a bit less accurate results, about the accuracy level of the CNC machine-tool. Some difficulties can occur when interpreting the Ballbar test results; however, the laser also has some disadvantages, especially the price of the laser equipment.

6 LITERATURA  
6 REFERENCES

- [1] Presentational CD for Ballbar device (2004) *Renishaw*, UK.
- [2] E.-S. Lee, S.-H. Suh, Ch.-H. Shin (1985) Performance evaluation of NC controller using a Ball-bar, *Annals of CIRP*, Vol. 34/1/1985, pp. 402-407.
- [3] Kopač J. (2003) Sočasno inženirstvo v teoriji in praksi = Concurrent engineering in theory and practice. *Strojniški Vestnik*, letnik. 49(2003)12, str. 566-574.
- [4] Balic J. (2006) Model of computer aided NC machine tool programming. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing systems*, Volume 17, Issue 1-2, July-August 2006.
- [5] Choi J.P., Minb B.K., Lee S.J. (2004) Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156, Year 2004, pp. 2056-2064.
- [6] »Help« program in Renishaw Ballbar software, version 5.06.17, *Renishaw*, UK.
- [7] Presentational CD for Laser ML10 device (2004) *Renishaw*, UK.
- [8] Okafor A.C., Ertekin Y.M. (2000) Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer, Part 1. Linear positional errors, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, Year 2000, pp. 394-406.
- [9] Iwasawa K., Iwamaa A., Mitsui K. (2004) Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder, *Precision Engineering*, Vol. 28, Year 2004, pp. 399-408.
- [10] W. Knapp (1993) Test of the three-dimensional uncertainty of machine tools and measuring machines and its relation to the machine errors, *ETH Zurich*, pp. 459-464.
- [11] Y. Kakino, Y. Ihara, Y. Nakatsu (1987) The measurement of motion errors of NC machine tools and diagnostics of their origins by using telescoping magnetic Ballbar method, *Annals of CIRP*, Vol. 36/1/1987, pp. 377-380.

Naslov avtorjev: Marko Cedilnik  
 prof. dr. Mirko Soković  
 dr. Jože Jurkovič  
 Univerza v Ljubljani  
 Fakulteta za strojništvo  
 Aškerčeva 6  
 1000 Ljubljana  
 mirko.sokovic@fs.uni-lj.si  
 marko.cedilnik@fs.uni-lj.si  
 joze.jurkovic@fs.uni-lj.si

Authors' adress: Marko Cedilnik  
 Prof. Dr. Mirko Soković  
 Dr. Jože Jurkovič  
 University of Ljubljana  
 Faculty of Mechanical Engineering  
 Aškerčeva 6  
 1000 Ljubljana, Slovenia  
 mirko.sokovic@fs.uni-lj.si  
 marko.cedilnik@fs.uni-lj.si  
 joze.jurkovic@fs.uni-lj.si

Prejeto: 19.7.2006  
 Received:

Sprejeto: 25.10.2006  
 Accepted:

Odrpito za diskusijo: 1 leto  
 Open for discussion: 1 year