

PENGUJIAN KETELITIAN GEOMETRIK MESIN PERKAKAS CNC MILLING VERTIKAL BUATAN DALAM NEGERI

Tri Prakosa, Agung Wibowo, Yatna Yuwana, Indra Nurhadi
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, 40132, Jawa Barat, Indonesia
Phone: +62-22-2512818, FAX: +62-22-2515716, E-mail: triprakosa@yahoo.com

ABSTRAK

Proses manufaktur adalah suatu aktivitas yang mentransformasikan material dan informasi menjadi barang dan jasa untuk memenuhi kebutuhan manusia. Proses ini sudah ada sejak generasi awal manusia, dan saat ini sudah mencapai tahap Advanced Manufacturing Technology, yang dicirikan dengan dua kata kunci: Otomasi dan Ketelitian tinggi. Proses manufaktur dilakukan dengan menggunakan mesin perkakas, sehingga ketelitian produk yang dihasilkan sangat tergantung pada ketelitian mesin perkakas yang digunakan. Industri manufaktur di Indonesia sebagian besar masih menggunakan mesin perkakas buatan luar negeri karena industri mesin perkakas dalam negeri belum berkembang. Saat ini PT-X sudah berhasil membuat mesin perkakas CNC dalam negeri, dimana proses pengecoran, pemesinan, perakitan sampai dengan pembuatan spindle dilakukan di Indonesia. Sedangkan controller, motor, ballscrew, linear guide dan ball bearing masih diimpor. Agar mesin perkakas yang dihasilkan tersebut dapat bersaing dengan buatan luar negeri, maka perlu dilakukan pengujian baik ketelitian geometrik maupun perilaku dinamikinya, untuk itu ITB, Departemen Perindustrian dan PT-X telah bekerjasama dalam pengujian ketelitian geometrik mesin perkakas CNC milling vertikal buatan dalam negeri. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Laser Interferometer dan DBB (Double Ball Bar), sesuai dengan Standar ISO-230. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketidakteelitian yang terjadi didominasi oleh ketegaklurusan antar sumbu serta simpang putar sumbu spindle. Hal ini mengindikasikan bahwa prosedur perakitan antar sumbu serta perakitan spindle perlu diperbaiki.

Kata kunci: Mesin perkakas, Ketelitian geometrik, Laser interferometer, DBB (Double Ball Bar)

1. Latar Belakang

Mesin perkakas adalah mesin yang digunakan untuk melakukan proses pemesinan suatu bahan dasar menjadi produk yang diinginkan. Untuk menghasilkan produk dengan ketelitian tinggi tentu saja memerlukan mesin perkakas (*machine tools*) dengan ketelitian yang tinggi pula. Pada tahun 2000, proses manufaktur dikategorikan sebagai “teliti” adalah jika ketelitian benda kerja mencapai di bawah $10\mu\text{m}$ dan dikategorikan “sangat teliti” jika di bawah $1\mu\text{m}$ [1].

Harga mesin perkakas teliti bisa mencapai dua kali harga mesin perkakas yang ketelitiannya satu tingkat di bawahnya. Meskipun demikian, proses manufaktur secara *mass production* dengan menggunakan mesin perkakas lebih teliti (*higher accuracy machine tools*) bisa jadi lebih menguntungkan dibandingkan dengan jika menggunakan mesin perkakas yang kurang teliti. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan nilai tambah (*added value*) produk, pengurangan waktu untuk proses *finishing* serta pengurangan waktu untuk proses penyetelan (*adjusting*) saat komponen tersebut dirakit pada sistem yang lebih kompleks.

Selama ini Indonesia termasuk negara dengan konsumsi produk manufaktur yang cukup tinggi, baik produk impor maupun produk lokal. Industri manufaktur lokal maupun asing yang dilokalisir, hampir semuanya masih menggunakan mesin perkakas dari luar negeri, khususnya mesin perkakas CNC (*Computerized Numerical Control*). Hal ini dapat dipahami karena industri mesin perkakas belum banyak berkembang di Indonesia.

Pemerintah yang diwakili oleh Departemen Perindustrian telah bekerja sama dengan ITB, dalam hal ini diwakili oleh Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, untuk membantu perkembangan industri mesin perkakas CNC dalam negeri. Salah satu wujud kerjasamanya adalah Departemen Perindustrian memberi bantuan Mesin CNC Milling Vertikal buatan dalam negeri kepada ITB untuk dievaluasi ketelitiannya.



2. Metode Pengukuran

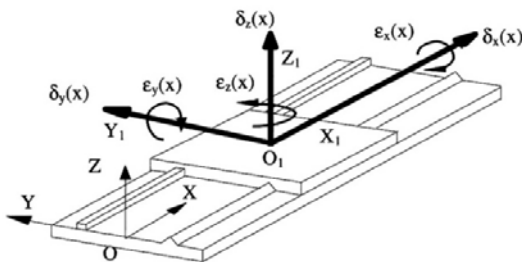
Selama proses pemesinan (*machining*) posisi mata potong (*tool tip*) akan bergeser dari posisi yang seharusnya, sehingga terjadi ketidaktepatan pada benda kerja yang dihasilkan. Besarnya pergeseran (deviasi) ini tergantung pada tiga faktor utama, yaitu: ketelitian geometrik (*geometrical accuracy*) mesin perkakas, defleksi akibat beban statik dan dinamik mesin dan deviasi akibat temperatur (*thermal drift*).

Ketelitian geometrik mesin perkakas dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu:

- (1) Ketelitian geometrik sumbu tunggal
- (2) Ketelitian geometrik antar sumbu

Sebetulnya terdapat satu lagi kesalahan geometrik, yaitu kesalahan putar sumbu spindel, yang tidak dibahas dalam makalah ini.

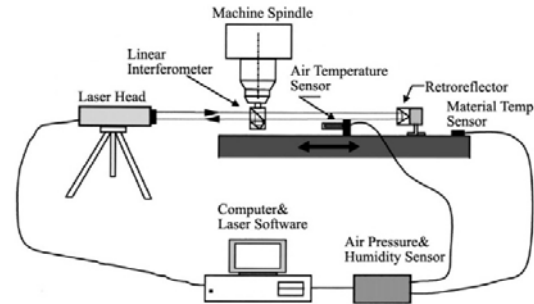
Ketelitian geometrik sumbu tunggal terdiri dari enam jenis kesalahan gerak (*error motion*), seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Enam kesalahan gerak ini terdiri dari tiga kesalahan gerak linier (pemosisian $\delta_x(x)$, kelurusan pada bidang vertikal $\delta_z(x)$, kelurusan pada bidang horisontal $\delta_y(x)$) dan tiga kesalahan gerak rotasi (*roll* $\varepsilon_x(x)$, *yaw* $\varepsilon_z(x)$, *pitch* $\varepsilon_y(x)$).



Gambar 1: Kesalahan gerak (*error motion*) sumbu tunggal (sumbu-x) suatu mesin perkakas^[2]

Ketelitian geometrik antar sumbu adalah kesalahan ketegaklurusan antar sumbu. Untuk mesin perkakas dengan tiga sumbu (X, Y dan Z) maka terdapat duapuluh satu kesalahan gerak (3x6 kesalahan sumbu tunggal: X, Y dan Z ditambah 3xkesalahan ketegaklurusan: XY, YZ dan XZ).

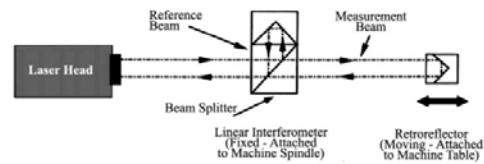
Kesalahan geometrik yang telah dijelaskan di atas dapat diukur secara manual dengan menggunakan: mandrel, penyiku, batang lurus (*straight edge*) dan *dial indicator* maupun dengan menggunakan laser interferometer, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.



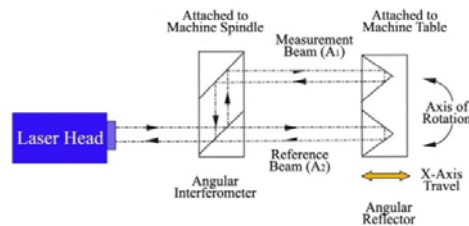
Gambar 2: Setup pengukuran dengan Laser Interferometer^[2]

Pengukuran kesalahan gerak linier dan pengukuran kesalahan gerak rotasi dilakukan dengan konfigurasi yang berbeda.

Untuk pengukuran kesalahan gerak linier, konfigurasi pengukurannya diperlihatkan pada Gambar 3, sedangkan konfigurasi untuk pengukuran kesalahan rotasi diperlihatkan pada Gambar 4.



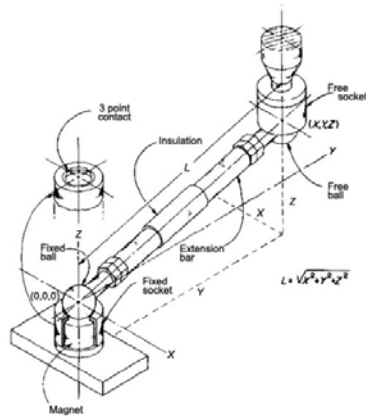
Gambar 3: Konfigurasi pengukuran kesalahan linier dengan laser interferometer^[2]



Gambar 4: Konfigurasi pengukuran kesalahan rotasi dengan laser interferometer^[3]

Salah satu kelebihan mesin perkakas CNC dibanding mesin perkakas konvensional, adalah kemampuannya menghasilkan gerak interpolasi, yaitu gerakan (lintasan pahat) yang direalisasikan dengan gerakan lebih dari satu sumbu secara serentak. Pengujian ketelitian geometrik yang telah dijelaskan sebelumnya (secara manual dan dengan menggunakan laser interferometer) tidak dapat digunakan untuk mengukur ketelitian interpolasi, karena pengukuran dilakukan untuk masing-masing sumbu sedangkan pengukuran antar sumbu hanya menghasilkan parameter ketegaklurusan.



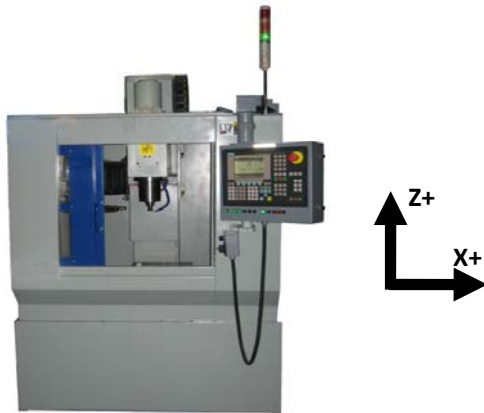


Gambar 5: Alat ukur interpolasi lingkaran untuk Mesin Perkakas CNC^[4]

Salah alat untuk menguji ketelitian interpolasi adalah alat uji interpolasi sirkular, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.

3. Pelaksanaan Pengukuran

Obyek ukur digunakan adalah Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal buatan dalam negeri (PT-X), seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Obyek uji, berupa Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal buatan dalam negeri

Alat ukur yang digunakan pada pengujian ini adalah:

- Metode manual: *Precision square, straightedge, dial indicator* dan *dial stand*
- Laser interferometer: merk Renishaw type XL 80
- Ball bar: Renishaw type QC 10

Laser interferometer yang digunakan tidak dapat digunakan untuk mengukur kesalahan gerak rotasi *roll*.

Pengukuran dengan metode manual dilakukan berdasarkan Standard Pengetesan Mesin Perkakas ISO 1984, [5]. Pengukuran dengan Laser Interferometer dilakukan sesuai dengan standar ISO 230-2, [6], sedangkan pengujian interpolasi lingkaran sesuai dengan ISO 230-4, [7].

4. Hasil Pengukuran

4.1 Pengukuran Manual

Pengukuran ketelitian geometrik secara manual, hanya dilakukan pada kelurusan gerak spindel (arah vertikal) pada bidang XZ dan YZ, serta kesejajaran antara meja (diwakili oleh *T-slot* meja) dengan gerak meja baik pada arah sumbu-X maupun arah sumbu-Y.

Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 1.

4.2 Pengukuran dengan *Laser Interferometer*

Laser interferometer yang ada tidak dapat digunakan untuk mengukur kesalahan *roll*, karena tidak dilengkapi dengan *4-quadrat photodiode*. Selain itu pada saat pengukuran ketegaklurusan antar sumbu, *alignment* sinar laser relatif sulit dilakukan, sehingga intensitas sinar yang kembali ke dalam laser head kurang.

Tabel 1: Hasil pengukuran ketelitian geometrik secara manual

No	Item pengukuran	Hasil
1	Penyimpangan kelurusan gerak spindel arah vertikal (bidang pengukuran XZ)	13 $\mu\text{m}/275$ mm
2	Penyimpangan kelurusan gerak spindel arah vertikal (bidang pengukuran YZ)	48 $\mu\text{m}/275$ mm
3	Penyimpangan kesejajaran meja terhadap gerak meja arah transversal (sumbu Y)	7 $\mu\text{m}/250$ mm
4	Penyimpangan kesejajaran meja terhadap gerak meja arah longitudinal (sumbu X)	9 $\mu\text{m}/300$ mm
Permissible value (ISO 1984), [5]		25 $\mu\text{m}/300\text{mm}$

Dengan demikian kesalahan yang dapat diukur antara lain:

- kesalahan pemosisian (*positioning error*)
- kesalahan kelurusan (*straightness error*) baik horisontal maupun vertikal
- kesalahan angular *pitch*, dan
- kesalahan angular *yaw*

Hasil keempat parameter tersebut diperlihatkan pada Tabel 2 sd Tabel 5 secara berurutan.

Tabel 2: Hasil pengukuran *positioning*

No	<i>positioning</i>			
	Item	Sumbu-X	Sumbu-Y	Sumbu-Z
	<i>Measurement length</i>	280 mm	250 mm	350 mm
1	<i>Mean reversal</i>	-33.393 μm	-50.277 μm	11.713 μm
2	<i>Unidirectional repeatability</i>			
	<i>forward</i>	17.393 μm	62.367 μm	14.425 μm
	<i>reverse</i>	25.880 μm	73.398 μm	60.245 μm
5	<i>Bidirectional repeatability</i>	70.975 μm	123.633 μm	60.245 μm
6	<i>Unidirectional accuracy</i>	189.284 μm	145.543 μm	90.047 μm

Tabel 3: Hasil pengukuran kelurusan (*straightness*)

No	<i>straightness</i>			
	Arah	Sumbu-X	Sumbu-Y	Sumbu-



				Z
1	Vertikal	6,2 $\mu\text{m}/$ 200 mm	6,8 $\mu\text{m}/$ 200 mm	42,4 $\mu\text{m}/$ 225 mm
2	Horisontal	16,6 $\mu\text{m}/$ 275 mm	6,5 $\mu\text{m}/$ 125 mm	13,0 $\mu\text{m}/$ 300 mm

Tabel 4: Hasil pengukuran kesalahan pitch

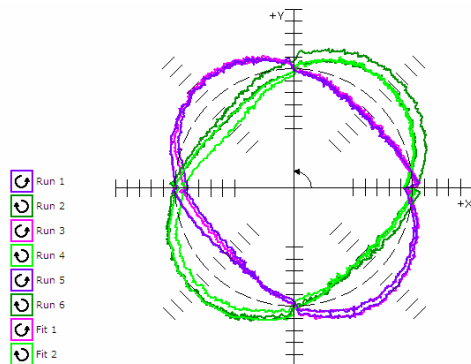
No	Item	pitch		
		Sumbu-X	Sumbu-Y	Sumbu-Z
1	Mean reversal	0,0070 $\mu\text{m}/$ mm	0,0056 $\mu\text{m}/\text{mm}$	-0,0005 $\mu\text{m}/\text{mm}$
2	Unidirectional repeatability			
	forward	0,0064 $\mu\text{m}/$ mm	0,0195 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0127 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	reverse	0,0148 $\mu\text{m}/$ mm	0,0424 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0106 $\mu\text{m}/\text{mm}$
5	Bidirectional repeatability	0,0170 $\mu\text{m}/$ mm	0,0424 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0127 $\mu\text{m}/\text{mm}$
6	Unidirectional accuracy	0,0657 $\mu\text{m}/$ mm	0,0982 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0665 $\mu\text{m}/\text{mm}$

Tabel 5: Hasil pengukuran kesalahan yaw

No	Item	Yaw		
		Sumbu-X	Sumbu-Y	Sumbu-Z
1	Mean reversal	-0,0688 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0048 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0005 $\mu\text{m}/\text{mm}$
2	Unidirectional repeatability			
	forward	2,1077 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0155 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,0051 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	reverse	2,1854 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0276 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0064 $\mu\text{m}/\text{mm}$
5	Bidirectional repeatability	2,1854 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0276 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0064 $\mu\text{m}/\text{mm}$
6	Unidirectional accuracy	82,6200 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0487 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,5759 $\mu\text{m}/\text{mm}$

4.3 Pengukuran dengan Ball Bar

Hasil pengukuran interpolasi lingkaran hanya pada bidang XY dan YZ, sedangkan bidang XZ belum dilakukan pengukuran. Hasil pengukuran untuk bidang XY diperlihatkan pada Gambar 7 dan Tabel 6, sedangkan untuk bidang YZ pada Gambar 8 dan Tabel 7.

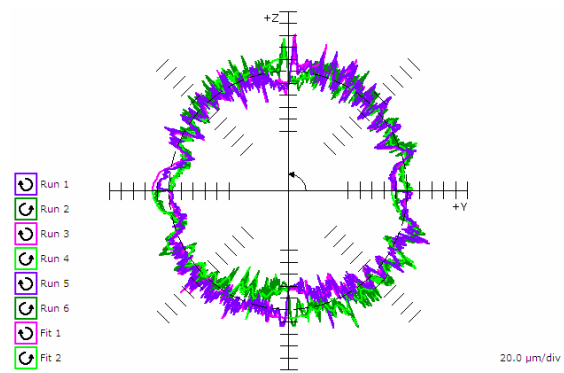


Gambar 7: Plot hasil pengukuran bidang XY

Tabel 6: Hasil pengukuran bidang XY

No	Item	Hasil pengukuran	
1	Backlash-X	► 80,1 μm	◄ 29,8 μm
2	Backlash-Y	▲ 29,4 μm	▼ 40,5 μm
3	Reversal spikes-X	► 17,9 μm	► 38,9 μm
4	Reversal spikes-Y	▲ 32,5 μm	▼ 21,2 μm
5	Lateral play-X	► 7,2 μm	◄ 54,2 μm
6	Lateral play-Y	▲ 1,7 μm	▼ 28,5 μm
7	Cyclic error-X	↑ 7,2 μm	↓ 54,2 μm
8	Cyclic error -Y	↑ 17,5 μm	↓ 16,3 μm
9	Servo mismatch	-22,56 ms	
10	Squareness	-221,0 $\mu\text{m}/\text{m}$	
11	Straightness-X	1,8 μm	
12	Straightness-Y	9,4 μm	
13	Circularity	479,5 μm	

4.3.2 Bidang-YZ



Gambar 8: Hasil Pengukuran bidang YZ

Tabel 7: Hasil pengukuran bidang YZ

No	Item	Hasil	
1	Backlash-Y	► 13,7 μm	◄ 20,0 μm
2	Backlash-Z	▲ 25,5 μm	▼ 35,7 μm
3	Reversal spikes-Y	► 11,6 μm	► 0,0 μm
4	Reversal spikes-Z	▲ 35,8 μm	▼ 0,0 μm
5	Lateral play-Y	► -14,0 μm	◄ 8,0 μm
6	Lateral play-Z	▲ 3,9 μm	▼ -3,1 μm
7	Cyclic error-Y	↑ 37,5 μm	↓ 18,4 μm
8	Cyclic error -Z	↑ 14,8 μm	↓ 14,5 μm
9	Servo mismatch	0,14 ms	
10	Squareness	3,9 $\mu\text{m}/\text{m}$	
11	Straightness-Y	-27,0 μm	
12	Straightness-Z	3,0 μm	
13	Circularity	114,9 μm	

5. Analisis

Berdasarkan Tabel 1, penyimpangan kelurusan gerak spindel arah vertikal (bidang pengukuran YZ) sebesar 48 $\mu\text{m}/275$ mm melewati batas yang diijinkan 25 $\mu\text{m}/300$ mm.



Berdasarkan Tabel 2, ketelitian pemosisian (*unidirectional accuracy*) pada arah sumbu X, Y dan Z secara berurutan adalah: 189.284 μm , 145.543 μm , 90.047 μm . Kesalahan ini dapat dikompensasi dengan software. Apabila secara software, kesalahan tidak dapat diturunkan sampai mendekati 10 μm , kemungkinan besar kesalahan sistematis *pitch* (*systematic pitch error*) *ball screw* yang digunakan sangat besar, sehingga harus diganti dengan *ball screw* yang lebih teliti.

Berdasarkan Tabel 3, kelurusan sumbu Z arah vertikal (pada bidang YZ) sebesar 42,4 $\mu\text{m}/225\text{ mm}$ sudah melewati batas yang diijinkan (25 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$). Hasilnya tidak jauh berbeda dibanding dengan yang diperoleh dari pengukuran secara manual.

Berdasarkan Tabel 4 s/d Tabel 5, kesalahan angular terbesar adalah *yaw* sumbu-X yang berharga 82,6200 $\mu\text{m}/\text{mm}$, atau sama dengan sudut sekitar 4° . Angka ini relatif besar sehingga perlu diperbaiki. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh permukaan kedua *linear guide* yang kurang rata atau kurang sejajar.

Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7 terlihat bahwa ketegaklurusan antara gerak sumbu X dan gerak sumbu Y adalah -221,0 $\mu\text{m}/\text{m}$, atau sekitar -66,3 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$, sedangkan ketegaklurusan antara gerak sumbu Y dan gerak sumbu Z adalah 3,9 $\mu\text{m}/\text{m}$ atau sekitar 1,17 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$. Dari hasil ini kelihatan bahwa perakitan antara sumbu X dan Y perlu diperbaiki. Selain itu besarnya harga *circularity* menunjukkan bahwa kesalahan interpolasi antar sumbu harus diperbaiki.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa ketidaktelitian terjadi selama proses perakitan, baik perakitan komponen, seperti *linear guide*, maupun perakitan antar sumbu (esalahan ketegaklurusan). Di antara berbagai kesalahan, maka kesalahan ketegaklurusan antar sumbu paling menonjol. Oleh karena itu proses perakitan perlu diperbaiki, misalkan penggunaan *overhead crane*, *jig* dan *fixture*, serta perbaikan SOP perakitan.

Referensi

- [1]. Taniguchi, Norio, *Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing*, Annals of the CIRP, Volume 32, No. 2, 1983, pp. 573-582
- [2]. Okafor, Anthony Chukwujekwu and Ertekin, Yalcin M., *Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 1. Linear positional errors*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 105, 2000, pp. 394-406
- [3]. Okafor, Anthony Chukwujekwu and Ertekin, Yalcin M., *Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 2. Angular errors*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 105, 2000, pp. 407-420
- [4]. Bryan, J. B., *A simple method for testing measuring machines and machine tools, Part-1: Principles and applications*, Precision Engineering, Volume 4, No. 2, April 1982, pp. 61-69
- [5]. ISO 1984, *Test conditions for milling machines with table of fixed height with vertical spindle*, First edition, 1980
- [6]. ISO 230-2, *Test code for machine tools, Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes*, Third edition, 2006-03-15
- [7]. ISO 230-4, *Test code for machine tools, Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools*, Second edition, 2005-04-01



