

ROBOTO „MOTOMAN SSF2000“ DINAMINIŲ SAVYBIŲ IR PAKARTOTINUMO TYRIMAS

Valius Šopa¹, Vladas Vekteris²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹vsopa@takas.lt, ²vladas.vekeris@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikiama roboto MOTOMAN SSF2000 dinaminių savybių ir pozicionavimo tikslumo tyrimas. Dinaminės savybės tirti buvo naudojama kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics ToolBox Type 9727“ su kompiuteriu DELL, kur buvo ištirti roboto rankos virpesiai, jam esant vertikaliajoje ir horizontaliojoje pozicijose, naudojant tris skirtingus greičius. Sukurta pozicionavimo tikslumo tyrimo metodika, kuri naudoja specialų stačiakampio gretasienio strypelio formos kalibrą ir indikatorius. Tyrimas buvo atliktas trimis skirtingomis sąlygomis, kur buvo keičiama įrankio masė ir greičiai.

Reikšminiai žodžiai: manipulatorius, pozicionavimo tikslumas, dinaminės savybės, industriniai robotai.

Įvadas

Sparčiai tobulėjant technologijoms, didėja tikslų robotų poreikis. Tarptautinės robotizacijos federacijos duomenimis, per 2005 metus pramoninių robotų rinka išaugo 30-čia procentų. Pramoninių robotų rinka pasaulyje labai sparčiai auga dėl mažų ir vidutinių įmonių, dirbančių tokiose srityse, kaip maisto, pakavimo, plastmasių ir gumos, vaistų, namų apyvokos gaminių ir netgi medienos ar baldų pramonė. Taip pat pramoniniai robotai skverbiasi ir į medicinos sektorių, kur yra reikalaujamas labai didelis robotų tikslumas (International Robot Federation).

Industriniai robotai pasižymi: efektyvumu, lankstumu, našumu, didesnėmis galimybėmis ir tikslumu (<http://www.profibus.lt/main/>).

Nors industriniai robotai šiuolaikinėje rinkoje demonstruoja labai didelį tikslumą, tačiau yra susidėvėjimo laikas, po kurio būtina patikrinti roboto technines savybes: ar jis vis dar atitinka gamintojo sąlygas (Yan Jin 2009). Pramoninių robotų tikslumą nusako pozicionavimo paklaida, kuri yra viena iš svarbiausių jų charakteristikų. Pozicionavimo tikslumas priklauso nuo daugelio veiksnių: robotui judesius suteikiančių pavarų paklaidų; mechanizmų detalių gamybos paklaidų; paklaidų, atsirandančių dėl roboto grandžių paslankumo. Priklausomai nuo roboto tipo, jo keliamosios galios, funkcionavimo sąlygų, kiekviena iš šių paklaidų gali turėti lemiamą reikšmę pozicionavimo tikslumui (Kyung-Jo Park 2004).

Roboto pozicionavimo tikslumas taip pat priklauso ir nuo aplinkos, kurioje buvo atlikti tyrimai: nuo išorinių virpesių ir temperatūros kaitos (Koseki 2009).

Šio straipsnio tikslas yra ištirti roboto dinamines savybes, sukurti pozicionavimo tikslumo tyrimo metodiką ir išmatuoti roboto tikslumą.

Tyrimo objektas ir metodika

Tyrimo objektas yra robotas „Motoman SSF2000“. „Motoman“ robotų pozicionavimo tikslumai siekia nuo $\pm 0,02$ mm (HP3J, HP3XF...) iki $\pm 0,5$ mm (PX2850, EPX2800R, EPX2900, PX1750-F50, PX2050-F50, PX2850-F50...). Nagrinėjamo roboto SSF2000 tikslumas yra $\pm 0,08$ mm. Kiti parametrai:

- laisvės laipsnių skaičius: 6;
- maksimali apkrova: 6 kg;
- maksimalus roboto pasiekiamumas: 1378 mm;
- svoris: 130 kg;
- įtampa: 1,5 KVA.

Atliekant technologinį procesą, roboto griebtuvas kiekvienu laiko momentu turi užimti erdvėje tam tikrą padėtį, kurią nustato programinės atskirų manipulatoriaus grandžių apibendrintųjų koordinačių reikšmės. Darbo metu roboto pavaros neužtikrina tikslų apibendrintųjų koordinačių reikšmių. Dėl to atsiranda darbo įtaiso pozicionavimo paklaida, t. y. kinematinė manipulatoriaus paklaida. Ji gali būti tiesinė ir kampinė.

Tiesinę manipulatoriaus griebtuvo paklaidą galima apskaičiuoti pagal:

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{q}_i} \Delta \mathbf{q}_i, \quad (1)$$

čia $\Delta \mathbf{q}_i$ – apibendrintosios koordinatės $\mathbf{q}_i$ paklaida.

Kampine manipulatoriaus paklaida vadinamas kampas, kuriuo reikia pasukti griebtuvą, kad koordinatinių sistemos $O_1'x_1'y_1'z_1'$ ašys būtų lgiagrečios su sistemos $O_1x_1y_1z_1$ ašimis.

Kiekviena roboto grandis turi automatinę pavarą, kuri užtikrina tam tikrą pozicionavimo tikslumą. Slenkamosios grandies tikslumas apskaičiuojamas taip:

$$\Delta S_i = \frac{K_m S_i}{D_i}, \quad (2)$$

Pozicionavimo procese dalyvauja tiesiaiegio ir kampinio poslinkių grandys. Suminė roboto pozicionavimo paklaida

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i + \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i \leq [\Delta], \quad (3)$$

čia ΔS_i – tiesiaiegio judesio grandžių paklaidos dedamoji; $\Delta \varphi_i$ – posūkio grandžių paklaidos dedamoji.

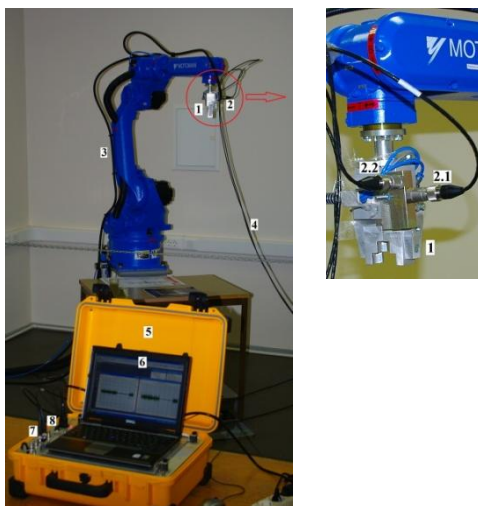
Leistinoji roboto pozicionavimo paklaida

$$[\Delta] = \frac{\Delta_0}{K_{\Delta}}; \quad (4)$$

čia Δ_0 – leistinoji bazavimo paklaida, nustatoma remiantis manipuliavimo objekto pastatymo tikslumo reikalavimais (Bakšys 2004).

Roboto savųjų virpesių tyrimas

Dinaminės savybės buvo tirtos trimis skirtingais greičiais: 3 mm/s; 16 mm/s; 30 mm/s. Tyrimai parodė, kad priklausomai nuo greičio didėja ir savieji virpesiai. Pagrindinis šio tyrimo tikslas buvo ištirti, kokie yra savieji virpesiai veikiant kiekvienam servovarikliui atskirai ir kaip tai gali paveikti įrankio darbą.



1 pav. Dinaminių savybių tyrimas: 1 – griebtuvas; 2 – akcelerometrai; 3 – manipulatorius; 4 – laidas; 5 – virpesių matavimo įrenginys; 6 – kompiuteris; 7,8 – akcelerometrų lizdai

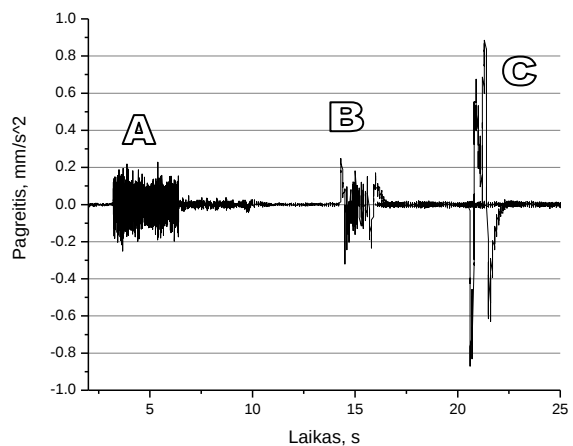
Fig. 1. Research of dynamic properties. 1 – vice, 2 – accelerometers, 3 – manipulator, 4 – wire, 5 – vibration measurement machine, 6 – computer, 7, 8 – inputs

Roboto (3) savieji virpesiai buvo tyrimai ant įrankio (1). Akcelerometrai buvo pritvirtinti taip, kad vienas matuotų virpesius X ašyje (2.1), o antras – Y ašyje (2.2). Akcelerometrais gauti rezultatai perduodami į kilnojimą virpesių matavimo rezultatų apdorojimo įrangą „Machine Diagnostics ToolBox Type 9727“ su kompiuteriu DELL (5), laidais (4). Vėliau kompiuteriu (6) virpesiai yra stebimi ir apdorojami (žr. 1 pav.).

Mažiausi ir didžiausi roboto rankos savieji virpesiai yra tikėtini tada, kai manipulatoriaus pozicija yra vertikali ir horizontali. Toliau tirsiu roboto rankos savituosius virpesius jam judant apie Z ašį.

Roboto rankos savieji virpesiai, kai roboto pozicija vertikali, pavaizduoti 1 pav.:

- A: greitis – 3 mm/s, minimali reikšmė – -0,250 mm/s², maksimali reikšmė – 0,228 mm/s², sklaida – 0,478 mm/s²;
- B: greitis – 16 mm/s, minimali reikšmė – -0,320 mm/s², maksimali reikšmė – 0,248 mm/s², sklaida – 0,568 mm/s²;
- C: greitis – 30 mm/s, minimali reikšmė – -0,870 mm/s², maksimali reikšmė – 0,885 mm/s², sklaida – 1,755 mm/s².



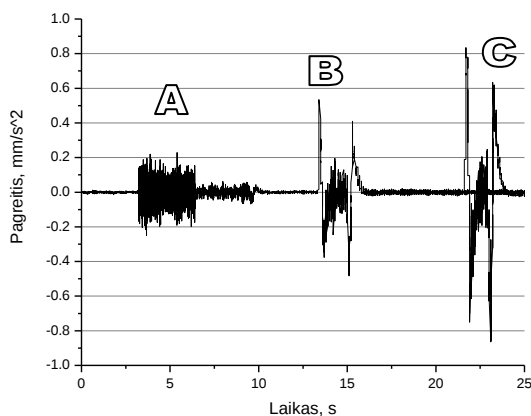
2 pav. Griebtuvo virpesiai, kai Z ašis juda trimis skirtingais greičiais, robotui esant vertikaloje pozicijoje: A – kai robotas juda 3 mm/s greičiu; B – 16 mm/s greičiu; C – 30 mm/s greičiu

Fig. 2. Tool center point (TCP) vibrations while Z axe is moving in three different speeds and the robot position is vertical. A – 3 mm/s, B – 16 mm/s, C – 30 mm/s

Roboto rankos savieji virpesiai, kai roboto pozicija horizontali:

- A: greitis – 3 mm/s, minimali reikšmė – -0,250 mm/s², maksimali reikšmė – 0,228 mm/s², sklaida – 0,478 mm/s².

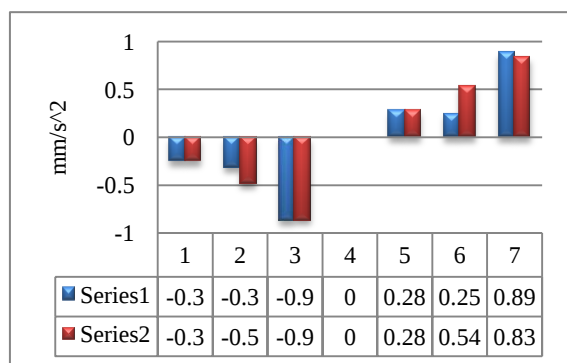
- B: greitis – 16 mm/s, minimali reikšmė – -0,482 mm/s², maksimali reikšmė – 0,535 mm/s², sklaida – 1,017 mm/s².
- C: greitis – 30 mm/s, minimali reikšmė – -0,864 mm/s², maksimali reikšmė – 0,834 mm/s², sklaida – 1,698 mm/s².



3 pav. Griebtuvo virpesiai, kai Z ašis juda trimis skirtingais greičiais, robotui esant vertikaloje pozicijoje: A – kai robotas juda 3 mm/s greičiu; B – 16 mm/s greičiu; C – 30 mm/s greičiu

Fig. 3. Tool center point (TCP) vibrations while Z axis is moving in three different speeds and the robot position is vertical. A – 3 mm/s, B – 16 mm/s, C – 30 mm/s

Toliau pateiktame paveiksle (4 pav.) labai aiškiai matyti manipulatoriaus savitųjų virpesių priklausomybė nuo jo pozicijos ir greičių.



4 pav. Vertikalios ir horizontalios roboto pozicijų virpesių palyginimas Z ašiai judant trimis greičiais. „Series1“ – važiuoja įrankio virpesius, kai robotas yra vertikaloje pozicijoje, o „Series2“ – horizontalioje pozicijoje; 1, 5 kolonų grupės – 3 mm/s; 2, 6 – 16 mm/s; 3, 7 – 30 mm/s

Fig. 4. Tool center point (TCP) vibrations' comparison between vertical and horizontal positions when Z axis is moving in three different speeds. Series1 – TCP vibrations when robot is in vertical position, Series2 – TCP vibrations when robot is in horizontal position. 1, 5 – 3 mm/s; 2, 6 – 16 mm/s; 3, 7 – 30 mm/s

Pozicionavimo tikslumo tyrimas

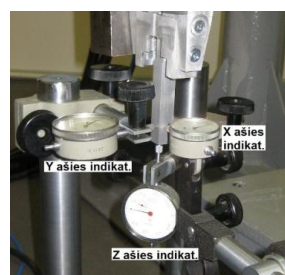
Pozicionavimo tikslumas buvo tiriamas pagal sukurtą metodiką, kur specialiai sukurta stende indikatoriai buvo taip išdėstyti, kad būtų galima išmatuoti visų trijų (X, Y ir Z) koordinačių ašių poslinkius. Į roboto griebtuvą buvo įstatytas kalibratorius, kuris yra stačiakampio gretasienio formos ir kurio visos plokštumos yra statmenos (5 pav.).



5 pav. Kalibratorius

Fig. 5. Calibrator

Tyrimo metu atitinkamai trys indikatoriai kontaktuoja su trimis kalibratoriaus (įstatytas į roboto griebtuvą, 5 pav.) sienelėmis (pav. 6.).



6 pav. Stendas su kalibratoriumi ir indikatoriais

Fig. 6. Display with calibrator stick and indicators

Prieš atliekant eksperimentą robotas yra pastatomas į tokią poziciją, kad būtų galima užfiksuoti jo esamą padėtį (6 pav.). Tuo metu indikatorių rodmenys yra nustatomi ant nulinės pozicijos. Tuomet robotui yra nustatomas darbas (1 lentelė), po kurio jis ir vėl turi sugrįžti į tą pačią poziciją iš kurios pradėjo vykdyti darbą. Jam grįžus ir nusistovėjęs yra užrašomi indikatorių rodmenys. Prieš atliekant bandymą iš naujo, indikatorių rodmenys ir vėl nustatomi ant nulinių pozicijų. Tokių bandymų buvo atlikta 150 atskirai su trimis skirtingais greičiais ir masėmis.

1 lentelė. Roboto darbo programa, kai roboto linijinis greitis yra 10 mm/s

Table 1. Robot's job, when linear speed is 10 mm/s

Nr.	Komanda	Greitis, 0,1 mm/s	Privedimas
0000	NOP		

0001	MOVL	V=100.0	PL=3
0002	MOVL	V=100.0	PL=3
0003	MOVL	V=100.0	PL=3
0004	MOVL	V=100.0	PL=3
0005	MOVL	V=100.0	PL=3
0006	DOUT	OT#(1)	OFF/ON
0007	MOVL	V=100.0	PL=3
0008	END		

Kiekvienam eksperimentui atskirai buvo keičiami greičiai: 10 mm/s, 55 mm/s, 100 mm/s; ir įrankio masės: 1,210 kg, 2,910 kg, 5,900 kg. Masių reikšmės programoje nesimato, nes jos yra nustatomos prie įrankio parametrų skyrelio. Eksperimento rezultatai pateikti 2 lentelėje ir 3 lentelėje.

2 lentelė. Pozicionavimo tikslumo eksperimento rezultatai, kai kinta įrankio masė

2 lentelė. Averages of positioning measurements data

Masė	ICT linijinis greitis		
	Kai v = 10 mm/s, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
1,210 kg	0.444	0.800	0.400
2,910 kg	0.333	0.756	0.689
5,900 kg	0.156	0.067	-0.022
	Kai v = 55 mm/s, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
1,210 kg	1.133	0.489	0.133
2,910 kg	2.056	1.044	0.333
5,900 kg	2.544	0.333	0.000
	Kai v = 100 mm/s, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
1,210 kg	1.422	0.444	0.111
2,910 kg	2.411	1.178	0.267
5,900 kg	3.056	0.489	-0.089

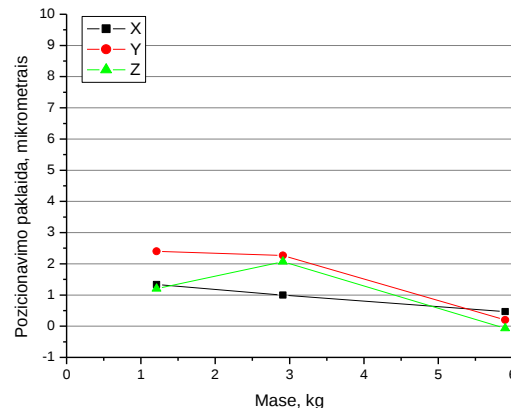
3 lentelė. Pozicionavimo tikslumo eksperimento rezultatai, kai kinta įrankio greitis

3 lentelė. Averages of positioning measurements data

Masė	ICT linijinis greitis		
	Kai m = 1,210 kg, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
10 mm/s	1.333	2.400	1.200
55 mm/s	1.600	2.600	1.733
100 mm/s	4.267	1.333	0.333
	Kai m = 2,910 kg, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
10 mm/s	1.000	2.267	2.067
55 mm/s	2.400	2.800	2.867
100 mm/s	7.267	3.533	0.800
	Kai m = 5,900 kg, μm		
	X ašis	Y ašis	Z ašis
10 mm/s	0.467	0.200	-0.067
55 mm/s	1.267	0.733	0.467
100 mm/s	9.167	1.467	-0.267

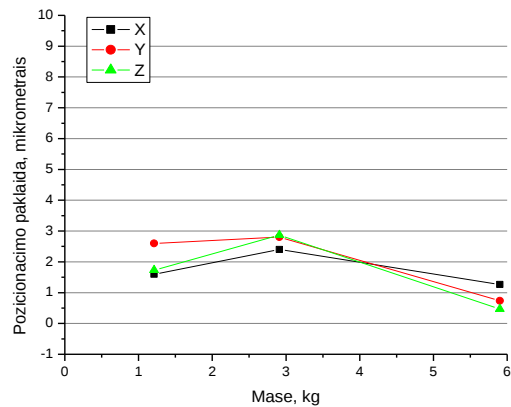
Toliau pateiktuose grafikuose (7 – 12 pav.) yra pavaizduoti eksperimento rezultatų vidurkiai. Eksperimentą suskirsčiau į šešias dalis, kur vienas nuo kito skyrėsi trimis skirtingomis masėmis ir trimis

skirtingais greičiais. Vienam eksperimentui buvo atlikti 150 bandymų.



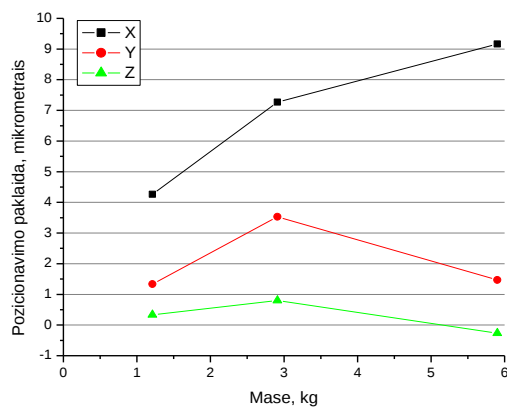
7 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo masės, kai linijinis greitis 10 mm/s

Fig. 7. Robot positioning error with respect of mass when robot's linear speed is 10 mm/s



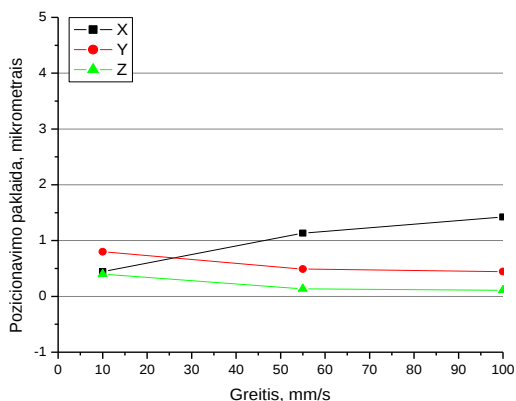
8 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo masės, kai linijinis greitis 55 mm/s

Fig. 8. Robot positioning error with respect of mass when robot's linear speed is 55 mm/s



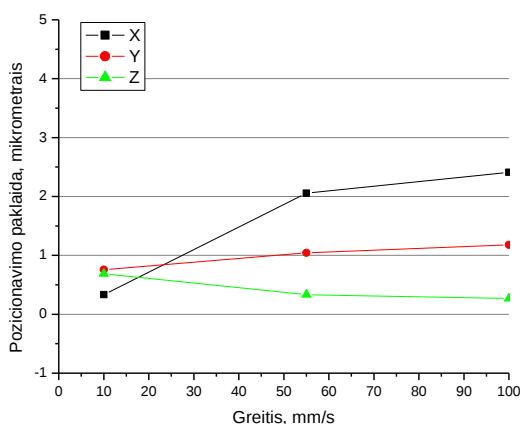
9 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo masės, kai linijinis greitis 100 mm/s

Fig. 9. Robot positioning error with respect of mass when robot's linear speed is 100 mm/s



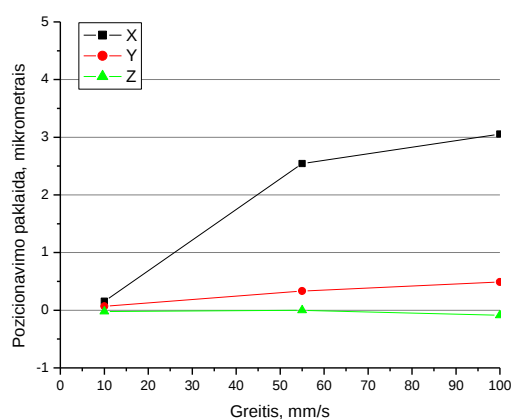
10 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo greičio, kai masė 1,210 kg

Fig. 10. Robot positioning error with respect of speed when robot's tool mass is 1,210 kg



11 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo greičio, kai masė 2,910 kg

Fig. 11. Robot positioning error with respect of speed when robot's tool mass is 2,910 kg



12 pav. Roboto paklaidos priklausomybė nuo greičio, kai masė 5,900 kg

Fig. 12. Robot positioning error with respect of speed when robot's tool mass is 5,900 kg

Tyrimai parodė, kad didėjant roboto greičiams ir įrankio masei, didėja ir pozicionavimo paklaida bei jos dažnis (6 – 11 pav.).

Tyrimo rezultatų analizė

Tiriant roboto savituosius virpesius, jam esant vertikalioje ir horizontalioje pozicijose, atitinkamai gautos šios sklaidos: 1) 3 mm/s: 0,478 mm/s² ir 0,478 mm/s²; 2) 16 mm/s: 1,017 mm/s² ir 1,017 mm/s²; 3) 30 mm/s: 1,698 mm/s² ir 1,698 mm/s². Rezultatai rodo, kad robotas, nors ir nežymiai, tačiau stabilesnis yra vertikalioje pozicijoje negu horizontalioje.

Tiriant roboto rankos pozicionavimo tikslumą aiškiai matyti roboto priklausomybė nuo masės, kur didėjant masei didėja ir pozicionavimo paklaidos. Labiausiai robotas yra netikslus X ašyje. Roboto priklausomybė nuo greičio yra analogiška: kuo greitis didesnis, tuo didesnė ir paklaida, tai ypač gerai matyti X ir Y ašyse. Z ašis šiuo atveju yra stabilesnė ir robotas joje turi mažesnes paklaidas. Eksperimente su greičiais lengvai matyti ta pati tendencija, kuri buvo ir su masėmis, kad X ašis yra mažiausiai stabili.

Išvados

1. Dinaminių savybių tyrimas, kurio metu buvo ištirti roboto savitieji virpesiai, rodo, kad robotas stabilesnis yra vertikalioje pozicijoje, negu horizontalioje.
2. Pozicionavimo tikslumo tyrimo rezultatai parodė, kad roboto MOTOMAN SSF2000 tikslumas, nors ir nežymiai, tačiau priklauso nuo roboto įrankio masės ir judėjimo greičių.

Tiriamas robotas dar pakankamai naujas, todėl nenuostabu, kad jis neviršija gamintojo nustatyto $\pm 0,08$ mm tikslumo.

Gauti rezultatai palyginti su teoriniais. Tyrimai parodė, kad maksimalūs nuokrypiai neviršija 25 proc. (tai yra 20,00 mikrometrų) teorinio (80,00 mikrometrų) nuokrypio, o vidutiniai nuokrypiai neviršija 16,67 proc. (13,33 mikrometrų).

Literatūra

- Anastasios John Hart, Alexander Slocum, Patrick Willoughby. 2004. Kinematic coupling interchangeability, *Precision Engineering*: 1-15p.
- Bakšys B. 2004. Robotų technika. *Technologija*: 40-81p.
- Brethe J.F.; Vasselin E.; Lefebvre D.; Dakyo B. 2005. Determination of Repeatability of a Kuka Robot Using the Stochastic Ellipsoid Approach, *International Conference on Robotics and Automation*: 1-6p.
- Ferreira P.; Lohse N.; Ratchev S. 2009. Repeatability Synthesis Methodology for Modular Ultra-Precision Assembly Systems, *Beijing University of Aeronautic and Astronautics*: 1-4p.
- International Robot Federation 2010. <http://www.irfnet.org/>.
- Jorge Santolaria, Juan-José Aguilar, Jos'e-Antonio Yag'ue, Jorge Pastor. 2008. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of

- articulated arm coordinate measuring machines, *Precision Engineering*: 1-18p.
- Koseki Y.; Tanikawa T.; Chinzei K. 2009. MRI-compatible Micromanipulator: Positioning Repeatability Tests and Kinematic Calibration, *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*: 1-4p.
- Kyung-Jo Park. 2004. Flexible robot manipulator path design to reduce the endpoint residual vibration under torque constraints. *Chonman*: 1-18 p.
- Leonesio M., Bianchi G. 2009. Manipulator calibration enhancement by means of mechanical templates, *Mechanism and Machine Theory*: 1-3 p.
- Motoman 2010. www.motoman.com.
- Patrick J., Willoughby, Anastasios J. Hart, Alexander H. Slocum. 2005. Experimental Determination of Kinematic Coupling Repeatability in Industrial and Laboratory Conditions, *Journal of Manufacturing Systems*: 1-14p.
- Shon P. Darcy, Jorge E. Gil, Savio L-Y.Woo, Richard E. Debski. 2009. The importance of position and path repeatability on force at the knee during six-DOF joint motion, *Medical Engineering & Physics*: 1-5 p.
- Xin-Gui Guo, De-Cai Wang, Cong-Xin Li, Ya-Dong Liu. 2002. A rapid and accurate positioning method with linear deceleration in servo system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*: 1-11 p.
- Yan Jin, I-Ming Chen, Guilin Yang. 2009. Kinematic design of a family of 6-DOF partially decoupled parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*: 1-11 p.

DYNAMIC PROPERTIES AND REPEATABILITY RESEARCH OF MOTOMAN SSF2000 ROBOT

V.Šopa, V.Vekteris

Abstract

In this article the dynamic properties, positioning precise and repeatability of MOTOMAN SSF2000 was researched. Dynamic properties was analysed by mobile equipment of measuring „Machine Diagnostic ToolBox Type 9727“ with a DELL notebook. The manipulator vibrations was measured in two robot positions: vertical and horizontal, and three different speeds. The technique of precise positioning was discovered, which uses a special caliber rod and displacement indicators. The research was made by tree different conditions, where tool mass and speeds were replaced.

Keywords: manipulator, precise of positioning, dynamic properties, industrial robots.