

## KAMPŲ MATAVIMO ĮRANGOS APŽVALGA IR PLĖTROS PERSPEKTYVOS

Giedrius Augustinavičius<sup>1</sup>, Audrius Čereška<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>mgkat@vgtu.lt; <sup>2</sup>audrius.cereska@vgtu.lt

**Santrauka.** Straipsnyje aprašyta kampų matavimo įranga ir kamparavimo būdai. Atlikta kampų matavimo įrangos tikslumo analizė. Įvertintas kampinių matavimų stendo kampinio pozicionavimo tikslumas. Numatytos kampų matavimo įrangos plėtros perspektyvos.

**Reikšminiai žodžiai:** kampų komparatorius, kampo keitikliai, kampo matavimai.

### Įvadas

Informacinės kampų matavimo sistemos ir jų elementai – rastrinės ir kodinės skalės, kampo keitikliai, žiediniai lazeriai (lazeriniai girometrai) – plačiai naudojami automatizuotose metalo pjovimo staklėse ir mašinos, robotų valdymo sistemose, matavimo prietaisuose ir navigacijos įrenginiuose. Linijinių poslinkių mechanizmai ir mašinos ir matavimo technika yra labai gerai išnagrinėti ir aprūpinti matavimo technika ir etalonais. To negalima pasakyti apie kampų matavimų prietaisus ir sistemas. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų tikrinimas reikalauja specialios įrangos ir kampo etalonų naudojimo, o šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose naudojamų kampų matavimo sistemų įvairovė dar labiau apsunkina šį uždavinį (Giniotis 2005).

Tik žinant kampų matavimo įrangos raidą galima tobulinti esamus ir kurti naujus matavimo būdus bei įrangą.

### Kampų matavimo įranga ir kamparavimo būdai

Toliau apžvelgiamos kampų matavimo priemonės.

*Poligonas / autokolimatorius.* Stendo centre yra precizinio tikslumo daugiakampė prizmė – poligonas. Precizinio tikslumo daugiakampė prizmė turi veidrodinius paviršius, tarp kurių yra labai tikslūs kampai. Paprastai daugiakampę prizmę sudaro 12–20 arba 24, 36, o kartais net 72 paviršiai (1 pav.). Daugiakampės prizmės dažniausiai gaminamos iš plieno arba kvarcinio stiklo (Giniotis 2005).

Autokolimatorius – tai prietaisas, naudojamas tikslams kampams palyginti, pasitelkiant veidrodžio atspindį.

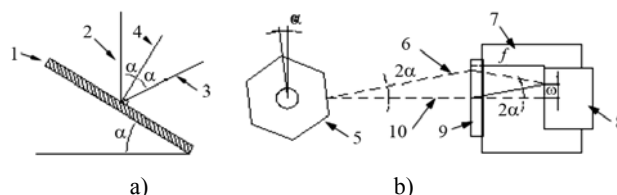
Autokolimatoriaus veikimo principas pagrįstas šviesos šaltinio atspindžiu nuo veidrodinio paviršiaus (2 pav.).

Kampas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto yra  $2\alpha$ . Matuojant kampą tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto galima nustatyti veidrodinio paviršiaus padėtį. Autokolimatoriaus šviesos srautas (taškas, linija ar kita forma) siunčiamas į daugiakampės prizmės paviršiaus plokštumą 5 ir tuo pat metu gražinamas į autokolimatoriaus okuliarą. Jei daugiakampės prizmės veidrodinio paviršiaus statmuo 4 nėra vienoje linijoje su autokolimatoriaus ašimi, t. y. su iš autokolimatoriaus siunčiamu šviesos srautu 10, tada prizmės statmuo su autokolimatoriaus ašimi sudaro kampą  $\alpha$ . Atsispindėjęs šviesos srautas 6



1 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais

Fig. 1. Example of polygon (pictures taken at PTB) with 8 mirror faces



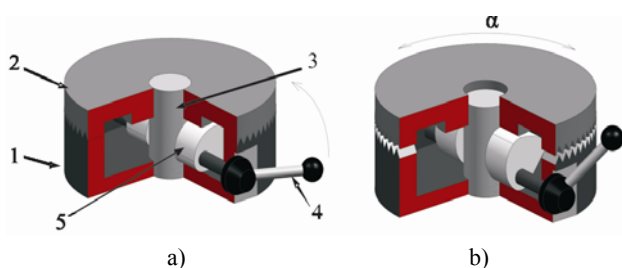
2 pav. Poligono / autokolimatoriaus veikimo principas: veidrodžio šviesos atspindys (a); autokolimatoriaus veikimo principas (b)

Fig. 2. Polygon/autocollimator work principles: mirror light reflection (a); b) autocollimator operation principle (b)

su autokolimatoriaus ašimi 10 sudaro kampą  $2\alpha$ . Atspindėjęs šviesos srautas per objektyvą 9 patenka į okuliarą 8. Apskaičiuavus atstumą  $\epsilon$  tarp siunčiamo ir sugražinto į okuliarą šviesos srauto galima nustatyti daugiakampės prizmės kampinę padėtį.

„Moore’s Precision Index“ *įrenginys*. Šiuo įrenginiu pasiekiamas labai didelis kampo pozicionavimo tikslumas, kurio paklaida neviršija 0,1”. Jo pagrindinę dalį sudaro dviejų disko pavidalo detalių sukabinimas dantukais, esančiais galiniuose šių diskų paviršiuose (3 pav.). Prietaiso išradimas patentuotas firmoje „Moore“ (JAV), o jo pagrindu buvo sukurti kampų matavimo prietaisai ir Lietuvoje (ISO 5725-4).

Prietaiso pagrindo 1 viršutinėje žiedinėje dalyje yra įpjauti maži dantukai turintys trikampį, plokščią arba rutulio dalies profilį, o dantukų pašaknyse – griovelius, kad dantukų sukabinimas būtų laisvas ir garantuotas, nebūtų ribojamas dantukų viršūnių netikslumų. Toks pat skaičius dantukų įpjautas viršutinio disko 5 žiediniame galiniame paviršiuje. Pasukus rankenėlę 7, kumštelis 6 per įvorę 4 pakelia viršutinį diską 5, dantukai atsiskiria, ir diską galima pasukti norimu kampu. Paskui jis vėl nuleidžiamas, dantukai susikabina, fiksuodami tikslią kampo padėtį (Total Stations Specifications 2009).



3 pav. Supaprastinta „Moore’s Precision Index“ įrenginio schema: matavimo padėtis (a); kampo keitimo padėtis (b)

Fig. 3. The cut-out section of simplified “Moore’s Precision Index” table: measuring position (a); angle changing position (b)

*Optinė skalė/mikroskopas*. Skalėi nuskaityti reikia labai tikslios apskritiminės skalės ir vieno arba kelių mikroskopų (priklausomai nuo matavimo metodų).

Taikant šį matavimo būdą reikia apskritiminio disko su ant jo įpresuota apskritimine skale. Daugelyje labai tikslių matavimo prietaisų pamatinio mato skalės dažniausiai gaminamos iš specialios medžiagos, vadinamos niuzilberiu (vok. *neusilber*, pažodžiui – naujasis sidabras – tai vario lydinys, turintis 20 % cinko ir 15 % nikelio), arba sidabro juostelių, įpresuotų į griovelį, esantį kito metalo (dažniausiai bronzos) disko paviršiuje (Giniotis 2005).

Matavimo tikslumas matuojant optine skale / mikroskopu priklauso nuo šių veiksnių:

- skalės padalų kokybės;
- matavimo proceso kokybės;
- mikroskopų kokybės;
- guolių ekscentriciteto;
- guolių susidėvėjimo.

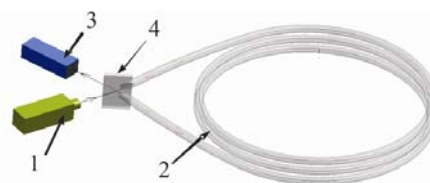
Apskritiminio disko kampinei padėčiai nustatyti naudojami mikroskopai. Limbo padėtis nustatoma naudojant linijines vertes. Žinant skalės skersmenį galima apskaičiuoti apskritiminio disko kampinę vertę.

*Kampiniai keitikliai*. Ši kampų matavimo priemonė labai plačiai taikoma mūsų dienomis. Kampiniai keitikliai naudojami metalo pjovimo staklių sukamųjų stalų pasukimo kampams matuoti ir valdyti, matavimo prietaisų kampų atskaitymo ir matavimo sistemose, pramoninių robotų kampinių dydžių matavimo ir valdymo sistemose. Kampinių keitiklių veikimas pagrįstas fotoelektriniu principu (Probst 1998).

Didesnio tikslumo kampiniai keitikliai veikia fotoelektrinio nuskaitymo principu (Principles of Action of the Angular Encoders 2009). Fotoelektrinio principo veikimas yra nekontaktinis. Šiuo metodu nuskaitytos keletu mikronų pločio linijos ir mažais periodais generuojami išėjimo signalai. Pagal nuskaitymo veikimo principus fotoelektriniai kampo keitikliai skirstomi į:

- optinio nuskaitymo;
- interferencinio nuskaitymo.

*Lazerinis girometras*. Šis prietaisas (4 pav.) dėl optinių šviesolaidžių (du šviesos spinduliai juda priešingomis kryptimis susuktame šviesolaidyje) naudojimo tapo itin kompaktiškas, teikiantis labai diskrečią informaciją. Tai labai plačiai techniniams matavimams naudojamas prietaisas (Kahmen 1998). Jo principinę schemą sudaro klasikinio girometro konstrukcija. Kvarcinio stiklo prizmės vidiniame paviršiuje du priešingomis kryptimis einantys lazerio spinduliai interferuoja, fotoelementas registruoja interferencinių juostų kitimą, o interferencijos



4 pav. Lazerinis girometras: 1 – šviesos šaltinis (lazeris); 2 – optinis šviesos kreiptuvas; 3 – šviesos priėmklis (fotodiodas); 4 – optinė prizmė

Fig. 4. Ring laser: 1 – light source (laser); 2 – optic light guide; 3 – light receiver (photodiode); 4 – optic prism

periodas dar gali būti interpoliuojamas. Kampo vertę ir jos pokytį galima išmatuoti 0,1" arba net 0,01". Matavimo tikslumas taip pat yra labai didelis, sistemingoji matavimo paklaida neviršija kelių dešimtųjų kampo sekundės. Prietaisas tinka naudoti navigacijos tikslams, juo galima matuoti sukimosi kampą, kampinius greičius ir pagreičius.

### Kampų matavimo įrangos tikslumo analizė

Atliekant matavimus poligonu / autokolimatoriumi pasiekiamas gana aukštas matavimų tikslumas, ekscentriciteto įtaka nedidelė, matavimo procesas gana paprastas (reikia autokolimatoriaus ir daugiakampės prizmės), nesudėtingas montavimas, tačiau matavimų intervalas yra mažas (apie 10"); matavimų diskretiškumas priklauso nuo daugiakampės prizmės paviršių skaičiaus ir jos tikslumo; gaunami nuokrypiai, kai matuojama ne prizmės paviršiaus centre.

Matuojant „Moore's 1440 Precision Index“ įrenginiu pasiekiamas matavimų tikslumas (mažiau nei 0,1"), matavimų diskretiškumas (mažiau nei 5"), paprastas įrenginio veikimo principas ir stabili konstrukcija, bet įrenginys brangus, matavimo procesą labai sudėtinga automatizuoti, įrenginio viršutinės plokštės pakėlimas sukelia papildomas matavimų paklaidas.

Labai tikslūs matavimai (priklausomai nuo mikroskopo tikslumo, mažiau nei 0,2") pasiekiami matuojant optine skale / mikroskopu; matavimų diskretiškumas, priklausomai nuo skalės, būna 1–5°, tačiau apskritiminė skalė yra didelio skersmens ir reikia, kad ji būtų preciziškai tiksli; būdingas labai ilgas proceso kalibravimo laikas.

Matuojant kampo keitikliais pasiekiamas mažiau nei 0,4" matavimų tikslumas, matavimų diskretiškumas – mažiau nei 0,01", nedideli įrenginio gabaritai, įrenginys patikimas ir jį lengva automatizuoti, tačiau reikia preciziškai tikslios mechaninės instaliacijos, be to, įrenginys gana brangus.

Lazerinio girometro tikslumas siekia apie 0,5", matavimo diskretiškumas mažas, tačiau neigiamas bruožas – naudoti šį įrenginį kampams komparuoti trukdo jo dinaminis veikimo principas.

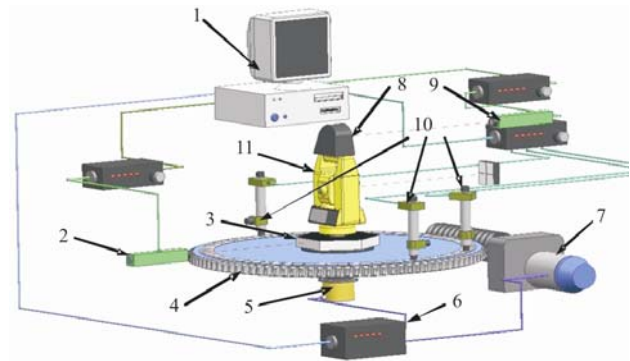
Vilniaus Gedimino technikos universiteto Geodezijos institute sukurtas specializuotas stendas kampų matavimo geodeziniais prietaisais kalibruoti. Stendui kurti panaudota tiksli (~3") ir standi apskrito dalinimo mašina, joje įdiegtas automatinis kompiuterinis valdymas.

Apskrito dalinimo mašina (5 pav.) buvo modernizuota – įmontuotas precizinis kampo keitiklis 5, žingsninis variklis su nuolatinio įvėržimo sliekine pavara 7 bei viso stendo veikimą valdantis elektroninis blokas 6 ir kompiuteris 1 (Giniotis *et al.* 2008).

Kompiuteryje nurodoma stendo stalo pasukimo kampinė padėtis. Duomenys perduodami į valdymo bloką, iš kurio impulsai žingsniam varikliui siunčiami tol, kol kampo keitiklio rodmuo pasiekia kompiuteryje nustatytą rodmenį (t. y. stalas pasukamas į reikiamą padėtį).

Kampo keitiklio rodmenys (stalo kampinė padėtis) lyginami su tikrinamojo prietaiso rodmenimis ir įvertinus prietaiso sukamosios dalies kampinę padėtį nustatomos prietaiso rodmenų paklaidos.

Siekiant tikrinti ir palyginti matavimus, prie stendo sumontuoti papildomi prietaisai – poligonas 3 su autokolimatoriumi 2 ir mikroskopai 10, naudojantys į sukamą stalą įmontuotą skalę kaip kampo etaloną. Ir autokolimatoriai (disko kampinės ir geodezinio prietaiso padėties nustatymo), ir mikroskopai modernizuoti naudojant CCD elementus, leidžiančius nuskaityti skalės brūkšnio padėtį ir perduoti rodmenis į kompiuterį.



**5 pav.** Bendra kalibravimo stendo schema: 1 – kompiuteris; 2 – autokolimatorius; 3 – daugiakampė prizmė; 4 – sukamasis stalas (sliekratis); 5 – fotoelektrinis kampo keitiklis; 6 – stalo pavaros valdymo blokas; 7 – žingsninis variklis su sliekine pavara; 8 – tikrinamojo prietaiso pozicionavimo veidrodis; 9 – tikrinamojo prietaiso padėties nustatymo autokolimatorius; 10 – mikroskopai; 11 – tikrinamasis geodezinis prietaisas

**Fig. 5.** Basic mode of test rig operation: 1 – PC; 2 – auto-collimator; 3 – polygon; 4 – rotary table of the rig; 5 – angle encoder; 6 – encoder/motor electronic control device; 7 – step motor/worm gear; 8 – mirror of the tested instrument; 9 – auto-collimator of position of the tested instrument; 10 – microscopes; 11 – tested instrument

Kampų kalibravimo stendas pavaizduotas 6 pav.

Išanalizavus keitiklių charakteristikas, nustatyta, kad tiksliausio šiuo metu gaminamo *Heidenhain* firmos (Vokietija) keitiklio paklaida siekia  $\pm 0,4$ , kai signalai formuoti, ir  $\pm 0,2$ , kai signalai specialiai derinti, neformuojant.

Kaip matyti iš lentelės, sukamojo disko pozicionavimo, atlikto fotoelektriniu kampo keitikliu, tikslumas yra nepakankamas, o nustatant kampinę padėtį skale / mikroskopu (tikrinant poligonu / autokolimatoriumi) buvo gana didelis tikslumas.

**Lentelė.** Kampo matavimo priemonių tikslumo reikšmės

**Table.** Mechanical errors of angle measurement devices

		Pozicionavimas fotoelektriniu keitikliu, tikrinant poligonu / autokolimatoriumi	Pozicionavimas fotoelektriniu keitikliu, tikrinant skale / mikroskopu	Pozicionavimas skale/mikroskopu, tikrinant poligonu / autokolimatoriumi
Pakartojamumas	Stand. nuokrypis	2,23''	2,34''	0,382''
	Neapibrėžtis	0,273''	0,287''	0,0468''
Atkuriamumas	Stand. nuokrypis	4,81''	5,20''	0,663''
	Neapibrėžtis	0,590''	0,638''	0,0813''



**6 pav.** Bendras kampų kalibravimo įrenginio vaizdas

**Fig. 6.** Base view of test rig

### Kampų matavimo įrangos plėtros perspektyvos

Kampo vieneto sietis realizuojama per daugiabriaunę prizmę – poligoną, tačiau, prireikus operatyviai kalibruoti limbus arba kampinių poslinkių keitiklius, šis metodas neužtikrina reikiamo kampo reikšmių skaičiaus, yra nenašus, juo negalima kalibruoti keitiklių elektrinių signalų lygiu. Todėl norint operatyviai kalibruoti turi būti papildomai numatomas arba precizinis kampinių poslinkių keitiklis, arba precizinis didelio skersmens limbas įvertinant kampą mikroskopais arba optoelektronine galvute.

Naujos kartos kampų matavimo įrenginių pavaros gali būti pjezoelektrinės. Šios pavaros yra paprastos konstrukcijos, mažų matmenų ir svorio, naudoja nedaug energijos, kai kurios jos charakteristikos – didelė skyra, greitaveika, paprastas valdymo algoritmas – labai svarbios mechatroninėms sistemoms kurti.

### Išvados

1. Automatizavus kampų komparatoriaus valdymo bloką patikros ir kalibravimo laikas labai sutrumpėja (ypač elektroninių prietaisų atveju) lyginant su įprastiniais patikros ir kalibravimo būdais.
2. Labai sutrumpėja duomenų įvedimo ir statistinio apdorojimo laikas, kadangi visi duomenys iš karto gautami elektroniniu būdu ir tuojau pat gali būti atliekami statistiniai skaičiavimai.

3. Disko pozicionavimo, atlikto turimu fotoelektriniu kampo keitikliu, tikslumas yra nepakankamas, o kampinės padėties nustatymo skale / mikroskopu (tikrinant padėtį poligonu / autokolimatoriumi) duomenys buvo gana didelio tikslumo.
4. Automatizuoto kampų komparatoriaus valdymo bloko pozicionavimas vis tiek nėra patogus, trukdo ir labai dideli įrenginio gabaritai, todėl tikslinga kurti tobulesnį kampų komparavimo įrenginį.

### Literatūra

- Giniotis, V. 2005. *Padėties ir poslinkių matavimas*. Monografija. Vilnius: Technika.
- Giniotis, V., et al. 2008. *Kampų matavimo sistemų tikslumo bandymo nanometrines skyros mechatroninių įrenginių kūrimas ir tyrimas (Gono test)*. Tarpinė ataskaita. Vilnius.
- ISO 5725-4:1994 *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 4: Basic Methods for the Determination of the Trueness of a Standard Measurement Method*. Geneva, 1994. 23 p.
- Kahmen, K.; Faig, W. 1988. *Surveying*. Berlin: Walter de Gruyter. 578 p.
- Principles of Action of the Angular Encoders* [interaktyvus]. 2009. Heidenhain [žiūrėta 2009 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.heidenhain.de/index.php?WCMSGroup\\_489\\_42=778](http://www.heidenhain.de/index.php?WCMSGroup_489_42=778)>.
- Probst, R.; Witterkopf, R.; Krause, M.; Dangschat, H.; Ernst, A. 1998. The New PTB Angle Comparator, *Measurement Science Technology, IOP Publishing* 9: 1059–1066.
- Total Stations Specifications* [interaktyvus]. 2009. Trimble [žiūrėta 2009 m. vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.trimble.com/totalstations.shtml?WT.svl=img3>>.

### REVIEW OF DEVICES FOR MEASURING ANGLES AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

G. Augustinavičius, A. Čereška

Abstract

The article analyzes the methods and devices for angle measurement. An accurate analysis of devices for angle measurement was performed. The accuracy of the angle position of the tested device was evaluated. The future perspectives of devices for angle measurement were explored.

**Keywords:** angle measurement, calibration of angle devices, angle comparator.