

Makina-erreminten errendimendua eta zehaztasuna

Machine Tool Performance and Precision

Jon Iñaki Arrizubieta, Ainhoa Celaya, Eneko Ukar, Aitzol Lamikiz*

Bilboko Ingeniaritza Eskola, UPV/EHU

LABURPENA: Zehaztasunaren ikuspuntutik makina-erreminten diseinuan, eraikuntzan eta martxan jartzean kontuan eduki behar diren puntu garrantzitsuenak bildu dira ikerlan honetan. Horregatik, artikuluko honetan, makina-erremintaren diseinu-printzipio garrantzitsuenak azaltzen dira. Gainera, makina-erremintetan ager daitezkeen erroreen ondoriozko ziurgabetasuna zenbatesteko gaur egun gehien erabiltzen den metodoan sakontzen da: errore-aurrekontua. Are gehiago, diseinu egokirako kontuan hartu behar diren printzipioak deskribatzen dira. Azkenik, makina-erreminta muntatu ostean, haren zehaztasuna zenbatesteko existitzen diren nazioarteko arau garrantzitsuenak aztertu dira.

HITZ GAKOAK: Makina-erreminta, zehaztasuna, erroreak, ziurgabetasuna.

ABSTRACT: *The most important concepts regarding precision when designing, building and setup of the machine tools are discussed. Therefore, in the present article, the most important design principles when developing a machine tool are explained. Besides, the most common method used nowadays for quantifying the uncertainty in machine tools is detailed: the error budget. Moreover, the principles required for a proper design are described. Finally, the most important global standards for measuring the precision of a machine tool are reviewed.*

KEYWORDS: *Machine tool, precision, error, uncertainty.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Jon Iñaki Arrizubieta Arrate. Ingeniaritza Mekanikoa Saila. Plaza Torres Quevedo, 1. 48013 Bilbao. Bizkaia, Euskal Herria. – joninaki.arrizubieta@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-6030-4941>.

Nola aipatu / How to cite: Arrizubieta, Jon Iñaki; Celaya, Ainhoa; Ukar, Eneko; Lamikiz, Aitzol (2019). «Makina-erreminten errendimendua eta zehaztasuna»; *Ekaia*, ale berezia 2019, 9-30. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.19725>).

Jasoa: 16 maiatza, 2018; Onartua: 16 uztaila, 2018.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2019 UPV/EHU

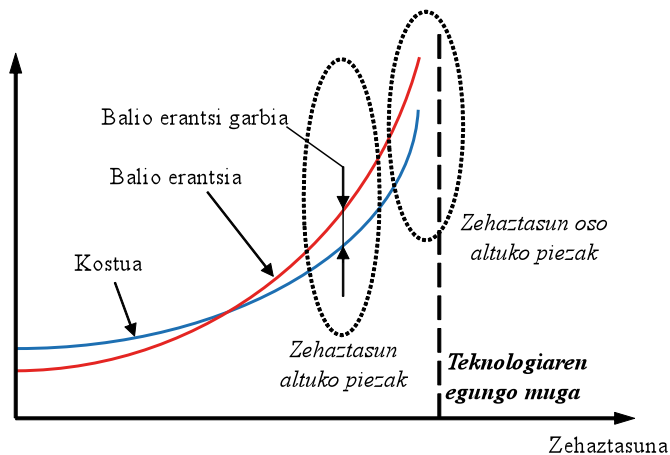


Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

Gero eta konpetentzia handiagoko merkatuan, makina-erremintaren fabrikatzaileak zehaztasun handiagoko produktuak eskaini beharrean aurkitzen dira, betiere salneurriak ahalik eta baxuen mantenduz. Honen adibide dira hegazkinen motorretako eta energia sektoreko turbinetan erabili beharreko gainazal konplexuko eta gero eta tamaina handiagoko piezen fabrikazioa [1, 2]. Alabaina, zehaztasun handiagoa, aplikazio anitzetan, kontrajarritako beharrezanekin batera doa, adibidez, produktibitate handiago batekin. Izan ere, zehaztasuna handitu arren, produkzioaren kostuak eta denbora lehen bezain baxu mantendu behar dira. Gainera, ingurunean sortzen duen eragina ere kontuan izan behar da. Hala, kasu askotan *errendimendu handiko fabrikazioa* konponbidetzat agertu da, non oinarrizko kontzeptua makina-erreminten eraginkortasun ekologikoa den.

Produkzioko ingeniariaren artean, beharrezkoa den zehaztasun-mailarekin batera, zabaldua dago fabrikaturiko piezaren kostua esponontzialki handitzen delako sineskera. Ideia horretan oinarrituz, XX. mendean bezeroaren eskariak asetzeko balio minimoan finkatu zen makinaren beharrezko zehaztasun-maila. Hortaz, zehaztasun handiagoko makinak guztiz ez-beharrezkotzat jotzen ziren. Hala ere, zehaztasunaren kontzeptu hau zaharkituta dago, banakoaren kostua bakarrik hartzen duelako kontuan.

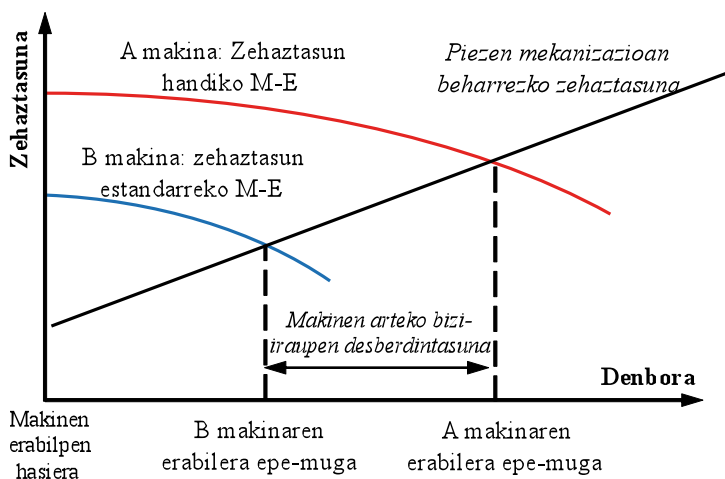


1. irudia. Piezaren balio erantsiaren, kostuaren eta zehaztasunaren arteko erlazioa.

Ordea, bukaerako produktuaren kostu totalak aztertuz gero, zehaztasuneko fabrikazioa espero baino eraginkorragoa dela ondorioztatu da [3].

Esate baterako, zehaztasunezko mekanizazioari esker, eskuzko akabera-eragiketa garesti eta konplexuak ekidin daitezke, piezaren guztizko kostua murriztuz. 1. irudian erakusten den bezala, zehaztasun handiko piezek ohiko piezek baino errentagarritasun handiagoa dute, balio erantsi handiagoa dutelako. Are gehiago, errentagarritasun handiagoa ez doa bakarrik irabazi ekonomikoekin lotuta, etorkizunari begira produktuaren merkatu-egonkortasun handiagoa ere bermatzen baitu.

Gaur egungo teknologia erabiliz, mekanizazioan 5 μm -tik beherako perdoiak lor daitezke. Perdoi hauetatik behera, ultra-zehaztasunezko mekanizazio-kontzeptua erabiltzen da. Jakina, merkatuak eskatzen duen zehaztasun-maila bezala (ikus 2. irudia), «zehaztasun-handi»aren kontzeptua ere uneoro aldatuz doa. Ondorioz, fabrikaturiko piezen zehaztasun-beharrizanak urtero handitzen direla jakinda eta makinaren zehaztasun-maila urtero murriztuz doala onartuz (lasaiera, gainazalen higadura...), zehaztasun handiko makina batek ohiko makina batek baino biziraupen luzeagoa duela baieztatu daiteke (ikus 2. irudia).



2. irudia. Makina-erremintaren zehaztasunaren eta bizi-iraupenaren arteko erlazioa [3].

Makina-erremintaren zehaztasun-maila aldagai estatistiko bezala definitzen da. Izan ere, fabrikazio-prozesuko baldintza errealek errore-iturri anitz sartzen dituzte prozesuan, zeinetatik asko ausazkoak diren eta zehaztasun-balioari eragiten dieten [4, 5, 6].

2. OINARRI-DISEINUAREN PRINTZIPIOAK ETA ERROREAREN AURREKONTUA

Makina-erremintarena bezalako sistema konplexuaren diseinuaren zailtasunik handienetakoa eraiki aurretiko ziurgabetasunaren estimazioa da; horretarako, errore-aurrekontua deituriko ingeniartzako diseinu-tresna erabiltzen da. Estimazioa errore bakunekin hasten da, bakoitzaren deskribapen eta kuantifikazioarekin, eta ostean errore bakoitzaren totalarekiko garrantzia definitu behar da. Horrela, diseinatzaileak posible du ziurgabetasun globalean pisu gehien duten erroreetan zentratzea. Behin erroreak identifikatuta, diseinatzaileek eta muntatzaileek errore horiek konponduko dituzte edo, ezinezkoa bada, ZKren (Zenbakizko Kontrolaren) bidez konpentsatuko dira ahal den neurrian.

Atal honetan, errore-aurrekontuko kontzeptu nagusiak azalduko dira. Horretarako, lehen urratsa, makina-erremintaren diseinuan, muntaketan, egiaztatapenean eta erabileran errore-iturri nagusiak identifikatzea eta ulertzea da.

2.1. Makina-erreminten erroreen jatorriak

Makina-erreminta diseinatzeko eta eraikitzeko ziurgabetasun iturri nagusiak honela sailka daitezke [7, 8]:

Errore geometrikoak eta zinematikoak

Akats mekanikoetan dute jatorria: esaterako, ardatzen desplazamenduak, labainderen hondaketa edo juntura eta akoplamenduen higadura. Erroreek eragin zuzena dute piezaren eta erremintaren arteko posizio erlazioan. Hala, zaila da erroreen jatorria geometrikoa edo zinematikoa den jakitea.

Oro har, makina konplexuek lortzen duten mekanizazio-zehaztasuna (bost ardatzeko makina-erremintak, esaterako) ohiko konfigurazioa dutenena baino txikiagoa da. Izan ere, hiru ardatzeko mekanizazio-zentroetan erroreen hedapena funtsean lineala da. Biraketa-ardatzen bat duten makinetan, ordea, erroreen hedapena ez da lineala kate zinematikoan zehar, eta horrek eragin handia du bukaerako errorean. Bestalde, kontuan izan behar da makinaren kokapeneko errorea bere aitzinapen abiadurarekin zuzenean erlazionatuta dagoela, eta abiadura handi batek errore handiagoak ematen dituela [9].

Ikertzaile anitzek ikertu dituzte hiru ardatzeko makina-erreminten akats geometrikoak. Adibidez, Nawarak [8] makina-erreminten errore formula-zioa 21 errore-osagai soiletatik hasita proposatzen du. Horretarako, erroreen aurreikuspena eta zuzenketarako algoritmoa aurkezten du. Lan horre-

taz gain, errore geometrikoa kalkulatzeko ereduak eta ZK barruan sartutako konpentsazio algoritmoak garatu dituzten hainbat erreferentzia aurkitu daitezke [10, 11]. Esaterako, makinako labainderen posizio-zehaztasun falta: talde honen barnean egongo lirateke engranajeetako edo akoplamenduetako lasaierak .

Bestalde, kontuan izan behar da sistema zenbat eta konplexuagoa izan orduan eta errore zinematikoko iturri gehiago egongo direla. Arrazoi honegatik, zehaztasun handiko makinek egitura oso sinpleak izaten dituzte, eta mugimendu-murrizpen minimoak erabiltzen dituzte. Izan ere, mugimendumurrizpenak, makinaren zurruntasuna handitzen duten arren, ziurgabetasun-iturri dira eta muntaian aparteko arreta eskaini behar zaie elementuen arteko lerrokatze-arazoak edo bestelako efektu hiperestatikoak saihesteko.

Errore termikoak

Errore termikoek izaera ez-lineal konplexua dute, eta horrek zaildu egiten du haien kudeaketa [12, 13]. Distortsio termikoen arrazoi nagusiak dira tailerrean gertatutako tenperatura-aldaketak, ebaketa-buruaren eta aitzinapen eragingailuen ondoriozko berokuntza lokalizatuak eta bero dauden txirbil-pilaketak.

Zurruntasun falta eta ebaketa-erreminten makurduragatik sortutako erroreak

Makina-erremintak ez dira erabat zurrinak. Hori dela eta, makinaren osagaien pisuak eta ebaketa-endarrek errore nabarmenak sortzen dituzte. Gainera, pisuaren ondoriozko errore hauek makinaren posizioaren arabera handiagoak edo txikiagoak izan daitezke. Bestalde, mozketa-endarrek errore handiak sor ditzakete ebaketa-erremintaren makurduragatik. Adibidez, erreminta esferiko batez burututako akabera-operazioan erremintaren makurduragatik sortutako errorea $40 \mu\text{m}$ -tara hel daiteke [3].

2.2. Errore-aurrekontuaren zehaztapena

Atal honetan, hiru ardatzeko abiadura handiko mekanizazio-zentroaren eta zehaztasun oso handiko (*ultra-zehaztasuna*) hiru ardatzeko mikro-mekanizazio zentroaren errore-aurrekontuaren kalkuluaren adibidea aurkezten da.

Aurrekontuak kontuan hartu behar ditu piezaren azken zehaztasunean eragiten duten elementu guztiak, hau da, makina-erroreak (errore geometrikoak, posizionamenduko erroreak, eta abar), mekanizazio-prozesuen erroreak (erreminten eszentrikotasuna, makurdura, bibrazioak, eta abar) eta ekipamendu osagarrietatik eratorritako erroreak (laneko piezaren kopena).

2.2.1. Makina-erremintaren erroreak

Makina-erremintaren erroreen barnean, honako hauek ditugu: makinaren eraikuntzan egindako akatsak, piezen higaduren ondorioz sortutako erroreak eta mugimendua sortzen duten transmisio-elementuen kontrol desegokiaren ondoriozko erroreak.

Barra gidariaren kokatze-errorea

Makinaren errepikagarritasunari eragiten dion errore hau ZKaren konpentsazio bidez murrizten da. Abiadura handiko mekanizazio-zentroetan, kodetze-erregela linealen bereizmena $1\ \mu\text{m}$ baino txikiagoa izaten da; zehaztasun handiko mikro-mekanizazio zentroek, ordea, $0,01\ \mu\text{m}$ baino gutxiagoko bereizmena gainditzen dute. Alabaina, bereizmen balio hauek labainderaren errore minimoa definitzen dute, eta balio horri gainerako erroreak gehitu behar zaizkio barra gidariaren ziurgabetasun-balio osoa lortzeko.

Erreferentzia-posizioaren ziurgabetasuna

Makina-jatorria edo makina-zero-puntua makina-erremintako fabrikatzaileek finkatutako puntua da eta erremintaren edozein mugimendu puntu honekiko neurtzen da. Errore horren jatorria makinaren zero-puntua ezartzean izaten den errepikagarritasunari lotuta dago eta hau soilik makina pizten denean da aplikagarria, hau da, makinak bere jatorrizko puntura joan behar duenean («ardatzen zeroak egitean»). Balio hau $3\text{-}5\ \mu\text{m}$ ingurukoa izaten da ohiko mekanizazio-zentro batentzat, eta $0,5\ \mu\text{m}$ zehaztasun handiko zentroen kasuan.

Hedapen termikoa

Makina-erremintaren barruko bero-iturrien (eragingailuak, mugimendu erlatiboa duten gainazal biren arteko marruskadura, eta abar) eta laneko gelaren tenperatura-aldaketen arabera, hedapen termikoaren ondoriozko erroreak izaera anitzekoak izan daitezke. Ohiko makina-erremintan kasuan, ziurgabetasun-balioa $5\ \mu\text{m}$ izan daitezke. Mikro-mekanizazioko zentroentzat, aldiz, iturri termikoak ondo isolatzen badira eta kontrola zaindu, errore hauek $0,5\ \mu\text{m}$ -tik beherakoak izan daitezke.

Mugimendu linealen alderantzikatzea

Neurtutako posizioen balioak desberdinak dira labainderak aurrerantz edo atzerantz mugitzen direnean. Errore horien zenbateko tipikoa $3\ \mu\text{m}$ -koa da ohiko makina-erremintan, eta $0,1\ \mu\text{m}$ -koa zehaztasun handiko zentroen kasuan.

Errore angeluarrak

Ardatz linealetako labainderak kulunkatze-, burukada- eta keinukada-efektuak jasaten ditu (*Pitch, Roll & Yaw*). Mekanizazio-zentro bateko errore angeluar arruntak ± 5 arcseg/100 mm-ko balioa du, eta zehaztasun handiko zentroan ± 3 arcseg/100 mm baino txikiagoa. Bestalde, posizioan eta zuzentasunean errore angeluarrek duten eragina ibilbidearen distantziarekiko zuzenki proportzionala da; hortaz, makina-tamainaren arabera.

Erroreen hedapena aplikatuz, ardatz linealaren ziurgabetasun estimatua $12 \mu\text{m}$ ingurukoa izan ohi da makina konbentzionaletan, eta $0,25 \mu\text{m}$ ingurukoa zehaztasun handiko zentroan. Estimazio honek makinaren eraikuntza mekanikoa barne hartzen du, baina, hala ere, beste ziurgabetasun batzuk ere kontuan hartu behar dira, hala nola, makinaren ibilbidearen erroreak eta mozketaren eragingailuaren erroreak.

Makina-ibilbidearen erroreak

Errore-iturri hau mikro-mekanizazioan arbuigarria da; izan ere, mekanizazio-abiadurarik bizkorrenean (50 mm/min) ere makina poliki-poliki mugitzen denez, ezarritako balioarekiko desbiderapen-errorea oso txikia da. Aitzitik, ZKdun abiadura handiko mekanizazio-zentroan, ibilbide teorikoaren eta errearen arteko desbiderapena $5 \mu\text{m}$ artekoa izan daiteke.

Ebaketa-erremintaren euste-sistemaren erroreak

Eszentrikotasuna erabilitako erremintaren zuzentasunaren arabera da, baina sortutako errorea nagusiki erremintaren eta matxardaren arteko loturaren zehaztasun-gabeziaren ondorio da. Merkatuan eskuratu daitezkeen matxardak eta erreminta-euskarri arruntek $10 \mu\text{m}$ -ko eszentrikotasun errorea izaten dute; zehaztasun handiko zentroko erreminta-euskarriek, aldiz, $3 \mu\text{m}$ -koa. Alabaina, erreminta-euskarri termikoei eskerrak, euste-sistemaren erroreak asko txikitzen dira, eta, horrela, ohiko mekanizazio-zentroetan $5 \mu\text{m}$ -ko eszentrikotasun maximoa bermatzen da.

2.2.2. *Mekanizazio-prozesuko erroreak*

Mekanizazio prozesuan sortzen diren ziurgabetasun-iturri nagusiak erremintaren makurduratik, erremintaren higaduratik eta prozesuko bibratioetatik datoz.

Erreminta-makurdura

Ebaketa-indarren eraginez, erreminta nabarmenki deforma daiteke. Txirbil-harroketan makurduraren balioa erabilitako erremintaren zurruntasunaren arabera da, eta zurruntasuna erreminta-luzeraren eta diametroaren arteko erlazioaren mendekoa da (lerdintasunaren mendekoa). Ohiko fresaketa-eragiketan erremintak 25-30 μm arteko makurdura jasaten du [14]; mikro-mekanizazioan, aldiz, ebaketa indarrak askoz txikiagoak dira (30-100 mN), eta, hortaz, baita erremintaren makurdura ere (3 μm inguru).

Erreminta-higadura

Erremintaren higadurak ebaketa-indarren handitzea eta erremintaren dimentsioen aldaketa dakar, eta, ondorioz, bukaerako piezaren zehaztasun-galera. Fenomeno hau oraindik gehiago areagotzen da mekanizatzen zailak diren materialekin lan egitean, adibidez Inconel 718 bezalako aleazio termoeogonkorrekin edo altzairu tenplatuekin, erremintaren biziraupena nabarmen laburtzen baita.

Bibrazioak

Mekanizatzean bibrazio mota bi agertzen dira. Lehenak beharturiko bibrazioak deitzen dira. Txirbil-harroketa bidezko prozesuan ebaketa-indarren ondoriozko bibrazioak handiak ez diren egoera batean, mozketa-hortzen talka-maiztasuna eta makinaren, erremintaren edo piezaren maiztasun naturalaren antzekok badira, bibrazioen anplitudearen anplifikazio dinamiko gertatzen da. Kasu hauetan, makina, erreminta edo pieza erresonantzia sartzen direla esaten da. Bigarrenak, auto-kitzikapenez sortutako bibrazioak dira (ingelesez «*chatter*» deituak), eta erremintaren eta piezaren artean 100 μm -ko desplazamendu erlatiboak eragin ditzakete.

2.2.3. Laneko piezaren kokapen-errorea

Mekanizatu beharreko piezaren kokapenean sortutako erroreak eta ondorengo erreferentziatzeak (zeroak egiteak) ez dute eraginik piezaren zehaztasunean. Piezak makina batetik bestera eramaten direnean, ordea, edota erreminta desberdinak erabiltzen direnean, errorea sartuko da bukaerako piezan. Horregatik, errore hauek ekiditeko «*Multi-Task*» makinaren erabilera gero eta zabalduagoa dago, makina bakarrean hainbat eragiketa egitea ahalbidetzen dutelako.

Bestalde, kokapeneko ziurgabetasuna murrizteko eta lerrokatzea bermatzeko merkatuan hainbat laguntza-sistema daude: Erowa® [15], Hirschmann® [16], Dock-lock® [17], ... Sistema hauei esker, piezaren ko-

kapenean $3 \mu\text{m}$ azpiko errepikagarritasuna lortzen da; balio hau erremintaren kokatze-errepikagarritasunari gehitu behar zaio.

2.2.4. Errorearen aurrekontu totala

Ziurgabetasun eta errorearen azterketa egin ostean, 1. taulan abiadura handiko mekanizazio-zentroen eta ultra-zehaztasunezko mikro-mekanizazio zentroen ziurgabetasun balioak jasotzen dira. Ziurgabetasun estandar konbinatua (u_c) eta ziurgabetasun hedatua (U) ondorengo formulen bidez kalkulatzen dira, hurrenez hurren:

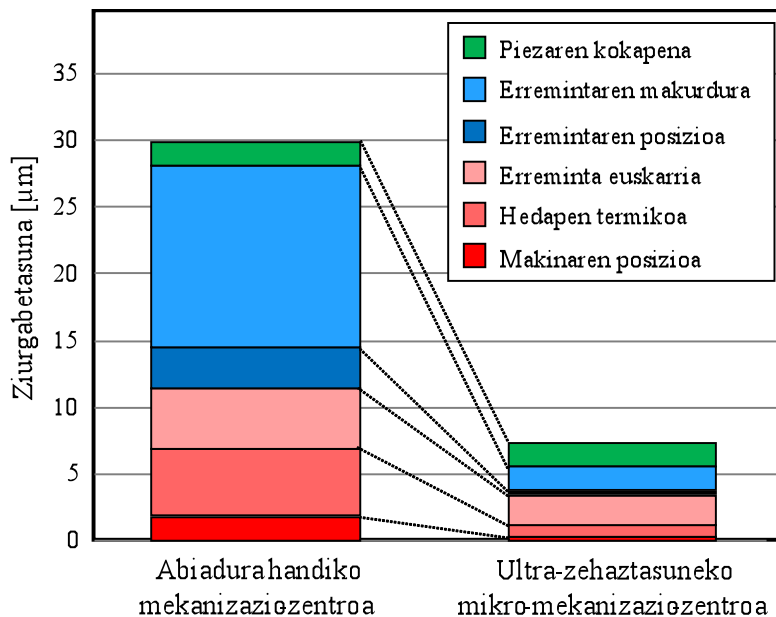
$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N |u(x_i)|^2 \quad (1)$$

$$U = 2 \cdot u_c \quad (2)$$

Abiadura handiko mekanizazio-zentro konbentzionalarentzat ziurgabetasun hedatuaren balioa $30 \mu\text{m}$ ingurukoa izaten da. Bestalde, ultra-zehaztasuneko mekanizazio-zentroaren ziurgabetasun hedatua (konfigurazio bakarrean) $5,5 \mu\text{m}$ izaten da, baina lerrokatze- eta kokapen-eragiketak kontuan hartzen badira, $7,5 \mu\text{m}$ -raino hazten da. Ziurgabetasun hedatuaren barneko errore-iturri anitzen garrantzia 3. irudian erakusten da.

1. taula. Ziurgabetasunaren ohiko balioak abiadura handiko eta ultra-zehaztasuneko mekanizazio-zentroentzat.

Ziurgabetasunaren jatorria...	Abiadura handiko mekanizazio-zentroa	Ultra-zehaztasuneko mikro-mekanizazio zentroa
Makinaren posizionamendua	$2,5 \mu\text{m}$	$0,13 \mu\text{m}$
Hedapen termikoa	$5,0 \mu\text{m}$	$< 0,5 \mu\text{m}$
Erreminta euskarria	$5,0 \mu\text{m}$	$2,2 \mu\text{m}$
Erremintaren posizioa	$3,5 \mu\text{m}$	—
Erremintaren makurdura	$15,0 \mu\text{m}$	$1,5 \mu\text{m}$
Piezaren kokapena	$3,0 \mu\text{m}$	$2,5 \mu\text{m}$



3. irudia. Ultra-zehaztasuneko eta abiadura handiko makina-erreminta zentroentzako errore-aurrekontua.

3. ZEHAZTASUNeko MAKINAREN DISEINURAKO OINARRIZKO PRINTZIOAK

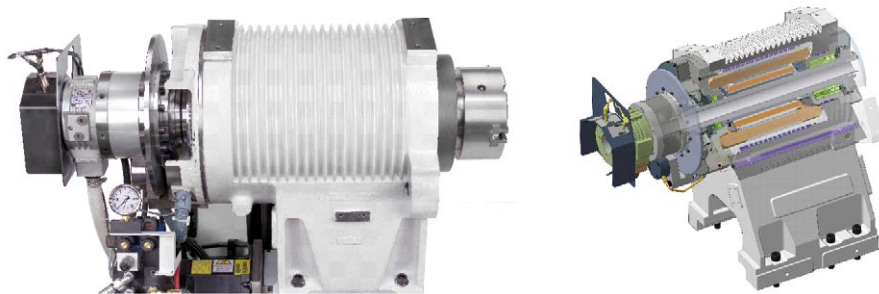
Errore-iturrien analisia eta ziurgabetasun hedatuaren kalkulua egin ondoren, jarraian zehazten diren oinarriko printzipioak ondorioztatzen dira. Hauek gehienetan logikan oinarrituak eta ulertzeko errazak diren arren, praktikan, printzipio horien dedukzioak konplexuak izan daiteke. Nakazawak [3] eta Slocumek [7] oinarriko gidak ematen dituzte makina-erremintaren diseinuan eta eraikuntzan behar den zehaztasuna lortzeko. Printzipio hauetako garrantzitsuenak honako hauek dira.

3.1. Makina-erremintaren egitura

Makina-erremintaren erroreak murrizteko, *Funtzionaltasun Printzipioak* ezartzen du erroreak elementu bakoitzean banatzeko komenigarria dela gorputz independenteak erabiltzea. Bestalde, *Diseinu Osoaren Printzipioaren* arabera, makinaren diseinua oinarriko eskakizunen arabera burutu behar da, eta ez da gomendagarria diseinu zaharren hobekuntza egitea edo diseinu zaharrei osagai berriak gehitzea.

Makina-erremintaren zurruntasunarekin zuzenean lotuta dagoen printzipioa *Betetze Printzipioa* da, zeinaren arabera makinak ahalik eta zurruntasun handiena izan behar du [18], baina ez bakarrik makina orokorrean kontsideratuta, baita indarrak aplikatzen diren guneeetan ere. 4. irudian *Diseinu Osoaren Printzipioaren* eta *Betetze Printzipioaren* adibidea aurkezten da, doitasun handiko operazioetarako bereziki diseinatutako *CMZ Machinery Groupen* torneaketa burua [19].

Azkenik, *Bero-deformazioaren Minimizazio Printzipioak* makina-erreminta berrien diseinurako arazo garrantzitsuenetakoa jorratzen du. Ahal izanez gero, makina-egiturek diseinu simetrikoa aurkeztu behar dute, horrela errazagoa baita deformazio termikoen konpentsazioa. Gainera, makinaren bero-iturriak (ardatz nagusia, eragingailuak...) lan-eremutik ahalik eta aldentuen egon behar dute, eta guztiz gomendagarria da gradiente termikoak saihesteko hozte-sistema egokiak diseinatzea.



4. irudia. *Diseinu Osoaren Printzipioa*: torneaketa buruan integratutako motorra, CMZ Machinery Group® enpresak garatua [19]. Ardatza olioaren bitartez hoztuta dago.

3.2. Mugimendu Errazaren eta Zinematikaren Diseinuaren Printzipioa

Ahal den kasu guztietan, makinaren junturetako mugimendu-murrizpenak minimoak izan behar dute. Horrela, *Diseinu Zinematiko* egoki batek mugimendu-murrizpenek sortutako deformazioak eragozten dituzte, eta elementu sentikorak elementu hedakorretatik eta fabrikaziorako doikuntza-guneetatik isolatzen laguntzen du.

Diseinu Zinematiko egokiak beharrezko murrizpen independente kopuru zuzena erabiltzen du. Diseinua egokia bada, murrizpenetako itxiera-indarrak bi gorputz zurrunen artean desiratutako askatasun-graduak bermatzeko adina izango dira.

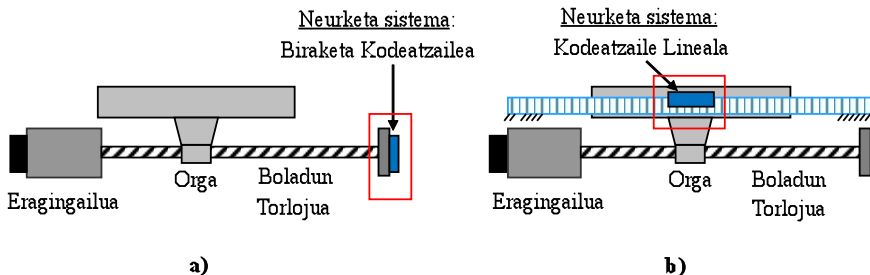
Mugimendu Errazaren Printzipioaren arabera, gida-mekanismoek gutxieneko marruskadura aurkeztu behar dute mugimendu erraza bermatzeko. Izan ere, osagai irristakorren arteko marruskadurak bibrazioen kontrola zailduko luketen efektuak sortzen ditu; esaterako, *stick-slipa*.

3.3. Abbe-ren Printzipioa

Metrologiaren oinarritzko printzipioa den honek honela dio: «neurtzeko luzerak eta neurketa-eskalak lerrokatuta egon behar dute». Ohiko makina-erreminta askotan mugimendu-sistema linealek ez dute Abbe-ren printzipioa betetzen, eragingailua eta elementu mugikorra ez daudelako lerrokatuta.

3.4. Posizio-neurketa

Makina-erremintan beti izango da hobe zuzeneko neurketa-sistema, kanpo-perturbazio edo -zaraten eraginetik libre dagoena, zeharkako neurketa baino. Bigarrenak, neurketa-balioa zehazteko zenbait parametro geometriko behar ditu, eta hauek errore-iturrien mendekoak dira. Esaterako, mugitzen den mahaiaren posizioa neurtzeko, hobe da haren gainean kokaturiko kodetzaille lineala erabiltzea, hari eragiten dion ardatzean kokaturiko kodetzaille angeluarra baino (ikus 5. irudia). Hala, kodetzaille angeluarrak ezin ditu kontuan hartu, beroaren edota jasandako indarren eraginez, torlojuak izan ditzakeen deformazioak. Gainera, sistema honek orgen eta bolen arteko lasaieraren ondorioz gerta daitezkeen mugimenduak ere ezin ditzake kontuan izan. Ondorioz, mahaiaren gainean kokaturiko kodetze-sistema linealak zehaztasun handiagoa eskainiko du.

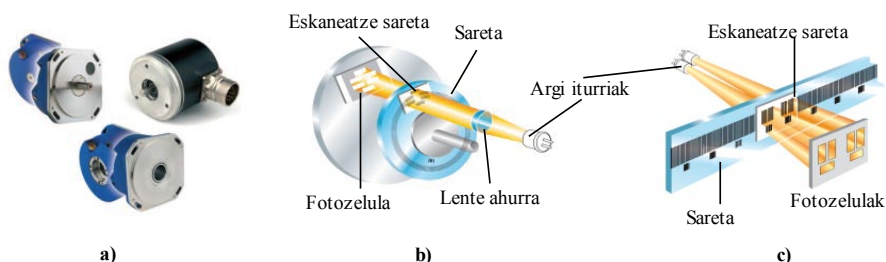


5. irudia. a) Biraketa kodetzaillean oinarritutako neurketa-sistema; b) kodetzaille linealean oinarritutako neurketa sistema.

Makina-erremintan erabilitako neurketa-gailu gehienak eskaneatze fotoelektrikoan oinarrituta daude, eta kontakturik gabe neurtzeko gai dira; beraz, ez dute higadurarik jasaten. Sistema hauek argi bidezko eskaneatze-gailuak erabiltzen dituzte, eta graduazio bera duten zulatutako bi saretetan zeharreko argi-izpi baten proiektzioan oinarritzen dira (ikus 6. Irudia). Zulatutako saretak (edo erregelek) bata bestearikiko mugimendu erlatiboa dute,

eta argi-izpiak sareten irekiduretatik igarotzean sortzen diren argi eta ilun tarteak sentsore fotoelektrikoak jasotzen ditu.

Kodetzeen bereizmena sareta-irekidurek duten maiztasunaren arabera da: zenbat eta maiztasun txikiagoa, orduan eta handiagoa da bereizmena. Bestalde, neurketa-zehaztasuna eskaneatzeko gailua eta sareta-arte muntaketa-doitasunaren arabera da. Sareta-estandarrek $20\ \mu\text{m}$ -ko banaketa-distantzia izaten dute irekiduren artean, nahiz eta zehaztasun handiko aplikazioetarako balio hau $4\ \mu\text{m}$ -ra murriztu daitekeen. Bestalde, neurketa-sistema bakarrean eskaneatze-sareta bakar bat baino gehiago egon daitezke, bakoitza dagokion fotozelularekin eta haien arteko posizio erlatiboa ezaguna izanda. Horrela, sareta-anitzek ematen dituzten neurketak interpolatuz, bereizmena handitu daiteke, $0,1\ \mu\text{m}$ -ra helduz zehaztasun handiko aplikazioetarako.



6. irudia. a) Biraketa-kodetzaila. b) Eskaneatze fotoelektrikoaren printzipioa biraketa kodetzaila eta kodetzaila linealarentzat (Fagor Automation®) [20].

3.5. Errorearen Zuzenketa-Printzipioa

Makina muntatuta dagoenean, sarritan haren zehaztasun orokorra beharrezkoa baino txikiagoa izaten da, eta horrek konpentsazio-teknika desberdinak aplikatzera behartzen du. Hala, neurketa-sistema aurreratuen bidez, laser interferometroen bidez adibidez, neurtu daitezkeen erroreak zuzendu edo behintzat minimizatu egiten dira, horretarako zuzenketa hauek taula formatuan ZK barnean sartzen direlarik. Zoritxarrez, konpentsazioek mugapenak dituzte, eta soilik konpentsazioak erabiliz, zehaztasun txikiko makina inoiz ezin izango da zehaztasun handiko bihurtu. Erroreen konpentsazio-konzeptu honekin erlazionatuta, hiru errore mota bereizten dira:

- *Errore Errepikakorrak.* Aurreikus daitezke, eta beraz, ZK bitartez konpentsatu. Normalean, errore geometrikoak talde honetan daude. Errepikakorrek diren erroreak akatsak dira, baina, ez dute ziurgabetasunik sortzen.
- *Errore Ez-Errepikakorrak.* Hauen barnean aurkitzen dira tenperatura, indarren, bibrazioen edo bestelako faktoreen arabera izaera aldakorra dutenak. Errore hauen zuzenketa zaila den arren, modelatzean, monitorizazioan eta kontrol-tekniken inguruan egindako

ikerlan anitzi esker, deformazio termikoak edo bibrazio-erroreak aurreikus daitezke, eta ondorioz, konpentsatu.

- *Ausazko erroreak*. Nahiz eta gaur egun hainbat eredu izan, oraindik egoera batzuetan errealitatearen eta diseinuen artean desberdintasunak daude, eta ezinezkoa da balio zehatzak lortzea. Horregatik, errore hauekin tratamendu estatistikoa besterik ezin daiteke erabili.

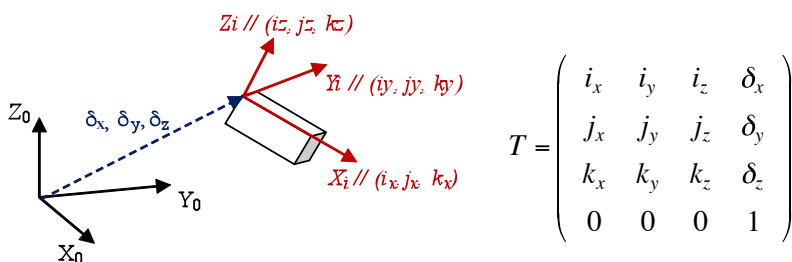
4. ERROREAREN HEDAPENA

Makina-erremintak espazio-mekanismoak dira, pare zinematiko gisa modelatu daitezkeen artikulazioez lotuak. Makina motaren arabera, eredu zinematikoa desberdina da eta «barra eta nodo» eskema baten bidez adieraz daiteke, beste edozein mekanismo bezala.

Mekanismoaren elementu bakoitzean $X_i Y_i Z_i$ koordenatu-sistema lokala zehazten da; beraz, elementuaren kokapena definituta egongo da jatorria den $X_0 Y_0 Z_0$ erreferentzia-sistema absolutuarekiko posizioa zehaztuz eta X_i , Y_i eta Z_i ardatzen biraketa adieraziz $X_0 Y_0 Z_0$ koordenatu sistemarekiko.

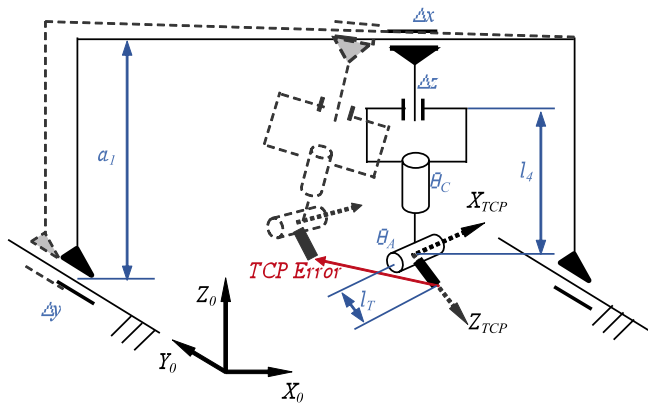
Emandako koordenatu sistemarekiko gorputz zurrun baten posizio espazial erlatiboa adierazteko metodo ezagunetarikoa *Transformazio Matrize Homogeneoa* deiturikoa da [21]. Metodo hau 4×4 ko matrize batean oinarritzen da, non lehenengo hiru zutabeek $X_i Y_i Z_i$ elementuaren erreferentzia-sistemaren bektore unitarioak adierazten dituzten erreferentzia-sistema absolutuarekiko. Laugarren zutabeak, aldiz, $X_i Y_i Z_i$ jatorriaren kokapena adierazten du erreferentzia-sistema absolutuarekiko, 7. irudian adierazten den bezala.

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$



7. irudia. Transformazio Matrize Homogeneoa elementu espazialaren posizioa adierazteko

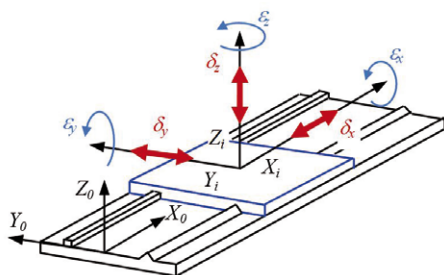
Transformazio Matrizen Homogeneoa erabiliz, $X_i Y_i Z_i$ sistema lokalean adierazitako edozein puntu $X_0 Y_0 Z_0$ erreferentzia-sistemarekin erlaziona daiteke. Horrela, makinaren erreferentzia-sistemarekiko ebaketa-erremintaren posizioa zehazteko (TCP edo Erreminta Zentro Puntua deitua), elementu bakunak transformazio-matritzeak biderkatuz transformazio matritze globala lortzen da, 8. irudian ikusten den bezala. Matritze honen elementuak honako hauen menpekoak dira: makina-erremintaren ardatzen posizioak (Δx , Δy , Δz , θ_A eta θ_C), makinaren egiturako parametro geometrikoak (a_1 edo l_4 gisa definituak beheko adibidean) eta erremintaren luzeraren araberrakoak (l_T).



$$T_{theoretical} = [T_1][T_2][T_3][T_4][T_5][T_{tcp}] = \begin{pmatrix} -\sin(\theta_C) \cdot \cos(\theta_A) & \cos(\theta_C) & -\sin(\theta_C) \cdot \sin(\theta_A) & -l_i \cdot \sin(\theta_C) \cdot \sin(\theta_A) + \Delta x \\ -\cos(\theta_C) \cdot \cos(\theta_A) & -\sin(\theta_C) & \cos(\theta_C) \cdot \sin(\theta_A) & l_i \cdot \cos(\theta_C) \cdot \sin(\theta_A) - \Delta y \\ \sin(\theta_A) & 0 & \cos(\theta_A) & -l_i \cdot \cos(\theta_A) - l_4 + a_1 - \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

8. irudia. Gantry motako bost ardatzeko mekanizazio-zentro erreal eta eredu zinematiko ideala.

Era berean, makinaren edozein elementuko errore geometriko, eredu zinematikoan parametro berri baten bidez kontsideratu behar da. 8. irudian eredu zinematiko teoriko eta erreala adierazten dira, eta ikusten den bezala, erremintaren puntaren posizioa $X_0 Y_0 Z_0$ koordinatu sistemarekiko askoz zailagoa da ebaluatzen errore guztiak kontsideratzen badira [22, 23].



Transformazio Matrize orokorra

$$Ti = \begin{pmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & a + \Delta x + \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & b + \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & c + \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Transformazio Matrize ideala

$$Ti = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a + \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

9. irudia. Gida lineal baten Transformazio Matrize Homogeneo orokorra eta ideala

Adibidez, izan bedi 9 irudiko gida lineala, zeinetan transformazio matrizeak organ ezarritako erreferentzia-sistemaren mugimendua ematen duen gidan kokaturiko erreferentzia-koordinatu sistema batekiko. Gida lineal idealaren kasuan, transformazio-matrizea sinplea izango da, gidaren geometriaren arabera a , b eta c balio konstanteak barneratuz, eta baita Δx orgaren mugimendua ere. Alabaina, erroreak kontuan hartzen badira, matrize erresultanteak translazio eta biraketa-osagai ezberdinak barneratuko ditu, 9. irudian ikusten den bezala. Errore-osagai hauetan barneratuta daude posizio-errore linealei dagozkienak (δ_x , δ_y , δ_z) eta errore angeluarrak (ϵ_x , ϵ_y eta ϵ_z , kulunkatze, burukada eta keinukada akatsak, hurrenez hurren). Gainera, errore hauek gidaren posizio bakoitzeko ezberdinak dira, eta horrek haiek aurretiaz esperimentalki neurtzea behartzen du.

Konplexutasun hori izan arren, elementu bakoitzaren erroreak barneratzen dituen *Transformazio Matrize Homogeneoa* tresna bikaina da makina-erremintaren zehaztasuna aztertu eta hobetzeko.

5. EGIAZTAPEN-PROZEDURAK

Makina-erremintaren egiaztapenaren helburua makinaren errore guztiak ezagutu eta neurtzea da, horrela, bere gaitasunak ulertu eta dokumentatzeko. Egiaztapen-prozeduren helburu garrantzitsuena errore sistematikoaren detekzioa da, errore hauek konpentsatzeko beharrezko informazioa emanez. Hori dela eta, prozedura estandarren definizioa funtsezkoa da makinaren zehaztasuna handitzeko.

Ikuspegi orokorretik begiratuta, makina-erremintaren egiaztapen-prozedurak bi multzotan sailka daitezke. Alde batetik, balioztatze geometrikoen bidez, makina karga gabeko baldintzetan kalibratzen da. Bestalde, makina ohiko funtzionamendu baldintzetan kalibratzen da, hau da, pieza mekanizatzen dagoen bitartean.

5.1. Makina Erremintaren Egiatzapen-prozedura Estandarrak

Balioztatze geometrikoko prozedurek makina-erremintaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna neurtzea dute helburu, eta normalean kargarik gabeko baldintzetan egiten dira. Arau estandarrek makina-erreminta nola egiatzatu zehazten dute, ardatz lineal eta birakariaren perdoi onargarriak emanez.

Araudiek kalibrazio-prozesurako helburu-puntuak ezartzen dituzte, eta makinaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna puntu hauetara hurbilketa ezberdinak eginez eta neurtuz lortzen dira. Proba hauen bidez, ardatz linealen zuzentasuna, paralelismoa, zurruntasuna, ... eta ardatz birakariaren zentroidetasuna, ... bezalako errorearen balioak zenbatesten dira. Horretarako, errore horiek doitasun handiko neurketa-gailuekin neurtu behar dira, laser interferometroak, kolimatzaileak, eta abar.

Zehaztasunaren eta errepikagarritasunaren definizio komuna izateko, nazioarteko hainbat estandar aurkeztu dira, garrantzitsuenak ISO 230-2, JIS B6201-1993 eta ASME B5.54 izanik. Estandar horiek, makinaren mugimendu lineal eta birakariaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna kalkulatzeko, neurketa eta parametro estatistikoen analisirako prozedurak ezartzen dituzte. Hala eta guztiz ere, estandar horien artean desberdintasun garrantzitsuak daude, batez ere helburu-puntua eta neurketa kopurua definitzeko orduan. Mundu-mailan gehien onarturiko estandarra ISO 230-2 da, honako oinarri hauek aplikatzen dituena:

- *Temperatura uniformea*: proba guztiak 20 °C-ko giro-temperaturan egin behar dira hedapen termiko erroreak ekiditeko.
- *Beroketa-zikloa*: proba guztiek makina-lanaren egoera simulatzen duen beroketa-zikloa barneratzen dute, horrela makinaren bero-iturriek sortutako erroreak kontuan izateko.
- *Noranzko bakarreko eta noranzko biko probak*: helburu-puntuetara noranzko bakarreko eta bi noranzko hurbilketak egiten dira, posizionamenduan norabidegarritasun-errorea zenbatesteko.
- *Helburu-puntu kopurua*: ardatz linealetan gutxienez 5 puntu neurtu behar dira luzera-metro bakoitzeko, eta ardatz birakarietan gutxienez 3 puntu 90 graduko.
- *Helburu-puntu bakoitzeko neurketak*: proba bakoitzak gutxienez 5 saiakuntza eskatzen ditu helburu-puntu bakoitzeko eta hurbilketa-noranzko bakoitzeko. Hori dela eta, helburu-puntu bakoitzerako neurri ugari lortzen dira eta honek errore-banda estatistikoen kalkulua baimentzen du.

Helburu-puntuen arteko distantziak desberdina izan behar du posizio ez-uniformeak lortzeko. Posizio-errorea i helburu-puntu eta j proba zenbakian x_{ij} gisa definitzen da. Gainera, araudiak noranzko bakarreko hurbilketa

positibo eta negatiboen artean bereizketa egiten du $x_{ij}\uparrow$ eta $x_{ij}\downarrow$ ikurren bidez, hurrenez hurren. Hortaz, helburu-puntuako n proba aukeratzen badira, posizio-errorearen batezbestekoa honako hau da:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad \text{eta} \quad \bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (4)$$

Norazko biko proben desbiderapena noranzko bakarreko posizio erroreen batez besteko balioaren bidez lortzen da:

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (5)$$

Hurbilketa positiboan eta negatiboan arteko mugimendu-inbertsioaren errorea honela kalkulatzen da:

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (6)$$

Bestalde, helburu-puntu bakoitzeko desbiderapen estandarrak honela kalkulatzen dira:

$$s_i \uparrow = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2 \quad \text{eta} \quad s_i \downarrow = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2 \quad (7)$$

ISO 230-2 araudiak ± 2 aldiz desbiderapen estandarraren balioko erre- banda erabiltzen du; beraz, helburu-puntu bakoitzerako errepikagarritasuna noranzko bakarreko proban $R_i \uparrow = 4s_i \uparrow$ eta $R_i \downarrow = 4s_i \downarrow$ dira. Errepikagarritasuna noranzko biko ikuspegitik begiratuta apur bat konplexuagoa da (ikus 8. Ekuazioa):

$$R_i = \max(2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow) \quad (8)$$

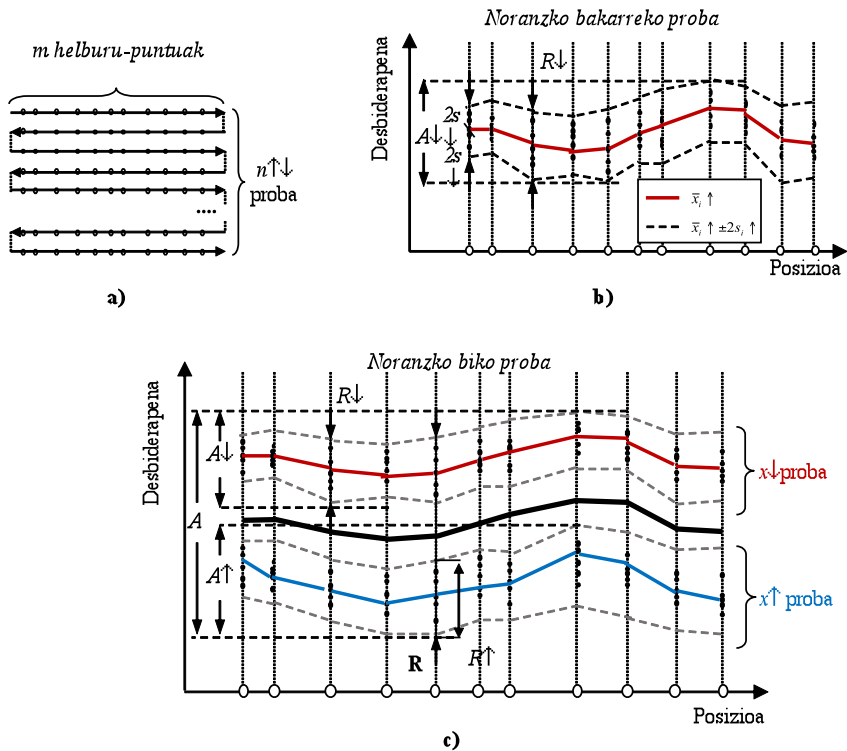
Horregatik, makina-erremintaren ardatzaren errepikagarritasuna, R , helburu-puntu bakoitzeko errepikagarritasun maximo gisa kalkulatzen da:

$$\begin{aligned} R \uparrow &= \max(R_i \uparrow) \\ R \downarrow &= \max(R_i \downarrow) \\ R &= \max(R_i) \end{aligned} \quad (9)$$

Azkenik, makina-erremintaren ardatzaren zehaztasuna ere 2σ -ko errore-banda batekin definitzen da, haren balioa ondorengoa izanik:

$$\begin{aligned}
 A \uparrow &= \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow) \\
 A \downarrow &= \max(\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow) \\
 A &= \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

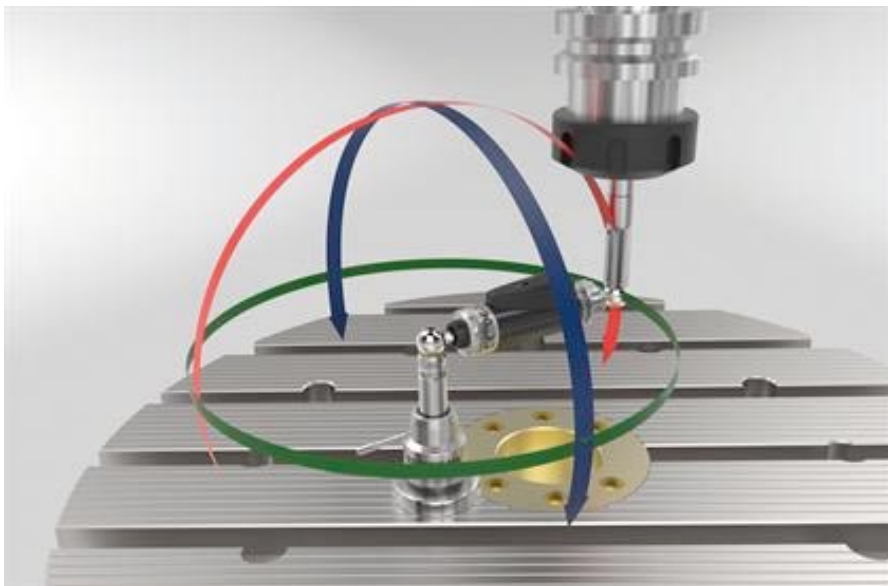
10. irudian, ISO 230-2 estandarraren arabera definitutako zehaztasuna eta errepikagarritasuna adierazten dira, noranzko bakarreko eta noranzko biko probetan. Helburu-puntuak banaketa ez-uniformea dute eta neurketak noranzko positiboetan eta negatiboetan egiten dira (ikus 10.a) irudia). Posizio-errore bakoitza kalkulatu ostean, zehaztasuna eta errepikagarritasuna noranzko bakarreko proba bakoitzerako ebaluatuko da, eta errore-banda 2σ irizpidea erabiliz kalkulatu. Azkenik, bi noranzkoen konbinazioa kalkulatzeko da makina-erremintako ardatzaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna zehazteko.



10. irudia. Zehaztasuna eta errepikapen adierazpenak ISO 230-2 estandarraren arabera b) noranzko bakarreko eta c) noranzko biko frogetan.

Makina-erremintaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna JIS B6201 estandarraren bidez ebaluatzen badira, lortutako balioak ISO 230-2 estandarraren bidez lortutakoak baino txikiagoak izango dira. Alde batetik, helburu-puntu kopuru txikiagoak (hiru puntu ardatz bakoitzeko) erabiltzen dituelako, eta bestetik, datuen kalkulua ez delako estatistikoa. Beraz, ISOren emaitzak erabilgarriak dira makina-erremintaren zehaztasun erreala kalkulatzeko, makina-erremintaren erroreek banaketa estatistikoa jarraitzen dutelako.

Alabaina, aurreko paragrafoetan proposatutako posizionamendu-probek makinaren ardatzak independenteki, bakoitza bere aldetik, neurtzen dituzte, eta, beraz, ardatz bakunaren interpolazioaren emaitza partzialak besterik ez dituzte ematen; adibidez, ardatz birakariaren zentrokidetasuna. Horregatik, estandarraz gain, bigarren proba-talde batek prozedura «erdi-estandarrak» barneratzen ditu makinaren interpolatzeko gaitasuna adierazteko. Proba hauek oso erabiliak dira eta hauetariko hedatuenak ASME B5 eta ISO 230 estandarrak onartutakoa «Ball-bar» proba da. Proba honek bi ardatzen arteko interpolazioa egiaztatzea ahalbidetzen du, errore-iturri ezberdinak detektatuz.



11. irudia. *Ballbar* bidezko makinaren kalibrazioa, *Renishaw*ren web orrialdetik ateratako argazkia [24].

6. ONDORIOAK

Artikulu honetan makina-erremintaren zehaztasuneko diseinu eta muntaia egiteko oinarritzko printzipioak eta metodologiak aurkeztu dira, baita makinaren zehaztasuna eta errepikagarritasuna kalkulatzeko prozedurak ere. Bestalde, zehaztasuna definitzea erraza den arren, haren balio numerikoa kalkulatzeko zaila dela ondorioztatu da: izan ere, dimentsio baten «bentako balioa» ez da inoiz ezaguna. Gainera, ISO 230 estandarrak oinarritzko kontzeptuak definitzen ditu zehaztasuna neurtu nahi denean.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] CHO M.H., KIM D.W., LEE C.G., HEO E.Y., HA J.W., CHEN F.F. 2009 «CBIMS: case-based impeller machining strategy support system», *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, **25**, 980-988.
- [2] JIA Z., MA J., SONG D., WANG F., LIU W. 2018 «A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **125**, 34-54.
- [3] NAKAZAWA, H. 1994. *Principles of Precision Engineering*. Oxford, UK.
- [4] DORNFELD, D., DAE-EUN LEE 2008. *Machine design for precision manufacturing*. Springer verlag USA.
- [5] EVANS, C. 1989. *Precision Engineering: an Evolutionary View*. Cranfield Press, Bedford UK.
- [6] RESHETOV, D.N., PORTMAN, V.T. 1989. *Accuracy of Machine Tools*. ASME Press Translations.
- [7] SLOCUM, A.H. 1992. *Precision Machine Design*. Englewood Cliffs, USA.
- [8] NAWARA, L., KOWALSKI, J. eta SLADEK, J. 1989 «The influence of kinematic errors on the profile shapes by means of CMM». *CIRP Ann-Manuf Technology*, **38**, 511-516
- [9] SLAMANI M., MAYER R., BALAZINSKI M., ZARGARBASHI S.H.H., ENGIN S., LARTIGUE C. 2010 «Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed end point constraint measurements», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **50**, 1063-1073.
- [10] SARTORI, S. eta ZHANG, G.X. 1995 «Geometric error measurement and compensation of machines». *CIRP Ann-Manuf Technology*, **44**, 99-609.
- [11] TSUTSUMI, M. eta SAITO, A. 2004 «Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centres with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 1333-1342.
- [12] RAMESH R., MANNAN M.A., POO A.N. 2000, «Error compensation in machine tools – a review Part II: thermal errors», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **40**, 1257-1284.

- [13] SCHWENKE H., KNAPP W., HAITJEMA H., WECKENMANN A., SCHMITT R., DELBRESSINE F. 2008 «Geometric error measurement and compensation of machines – an update», *CIRP Ann. – Manuf. Technol.*, **57**, 660-675.
- [14] SALGADO, M.A., LÓPEZ DE LACALLE, L.N., LAMIKIZ, A., MUÑOA, J. eta SÁNCHEZ, J.A. 2005 «Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**, 727-739.
- [15] www.erowa.com/en/homepage.html (*eguneratua* 2018/05/09).
- [16] www.hirschmannngmbh.com/en/ClampingSystems (*eguneratua* 2018/05/09).
- [17] www.vb-tools.com/vbweb_en/produkte_de/DockLock.php (*eguneratua* 2018/05/09)
- [18] JAKSTAS A., KAUSINIS S., BARAUSKAS R., KASPARAITIS A., BARAKAUSKAS A. 2014 «Thermal error analysis in precision length measurements», *Measurement*, **51**, 133-146.
- [19] www.cmz.com/fabricante-tornos-cnc.php (*eguneratua* 2018/05/09).
- [20] <http://www.fagorautomation.com/> (*eguneratua* 2018/05/09).
- [21] LAMIKIZ, A., LÓPEZ DE LACALLE, L.N., OCERIN, O., DIEZ D. eta MAIDAGAN, E. 2008 «The Denavit and Hartenberg approach applied to evaluate the consequences in the tool tip position of geometrical errors in five-axis milling centres», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37**, 112-139.
- [22] HSU, Y.Y. eta WANG, S.S. 2007 «Mapping geometry errors of five-axis machine tools using decouple method». *Int Precision Technology*, **1**, 123-132.
- [23] SRIVASTAVA, A.K., VELDHUIS, S.C. eta ELBESTAWI, M.A. 1995 «Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **35**, 1321-1337.
- [24] www.renishaw.com/en/qc20-w-ballbar-system--11075 (*eguneratua* 2018/05/09).