



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Boladun torlojuen zinematikaren
birdefinizioa**

*Pello Alberdi, Aitor Arana,
Aitor Oyanguren, Jon Larrañaga
eta Ibai Ulacia*

203-210 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.25>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



LAGUNTZAILEAK



Boladun torlojuen zinematikaren birdefinizioa

Pello Alberdi¹, Aitor Arana¹, Aitor Oyanguren¹, Jon Larrañaga¹, Ibai Ulacia¹

¹Mondragon Unibertsitatea, Ingeniaritza Fakultatea, Mekanika eta Industria Produkzio Departamentua, Arrasate-Mondragon
palberdi@mondragon.edu

Laburpena

Bolen orbita-abiadura eta biraketa-abiadura funtsezko aldagai zinematikoak dira boladun torlojuen portaera dinamikoak aurreikusteko. Besteak beste, potentzia-galeren, bibrazioen analisiaren, bolen pasatze-maiztasunaren eta higadura-fenomenoen azterketan. Hala ere, literaturan aldagai horiek kalkulatzeko erabiltzen den formulazio teorikoak ez du helize-angeluak eragindako abiadura transbertsalaren efektua kontuan hartzen. Lan honetan formulazio berri bat aurkezten da, efektu hori erabat barneratzen duena, eta bi ikuspegi horien arteko alde esanguratsuak erakusten ditu, bereziki helize-angelu handietan. Horrez gain, metodologia experimental berri bat aurkezten da orbita-abiadura neurtzeko, bolaren orbita-biraketaren eta torlojuaren desplazamendu angeluarraren arteko erlazioa kalkulatzeko. Esperimentu bidez lortutako emaitzek bat-egite sendoa erakusten dute proposatutako formulazioaren aurreikuspenekin.

Hitz gakoak: Boladun torlojuak, Zinematika, Orbita-abiadura, Biraketa-abiadura

Abstract

The orbital and angular speeds of the balls are fundamental kinematic variables for predicting the dynamic performance of ball screws, including power losses, vibration analysis, ball passing frequency, and wear phenomena. However, the theoretical formulation employed in the literature to calculate these variables does not account for the effect of transversal velocity component introduced by the helix angle. The present work introduces a new formulation that fully incorporates this effect, demonstrating substantial differences between the two approaches, especially at high helix angles. Additionally, a novel experimental methodology is presented to measure the orbital speed by calculating the ratio between the orbital rotation of the ball and the angular displacement of the screw. The experimental results show strong agreement with the predictions of the proposed formulation, offering more accurate results than existing models in the literature.

Keywords: Ball screws, Kinematics, Orbital speed, Rotational speed

1 Sarrera eta motibazioa

Boladun torlojuak mugimendu birakaria mugimendu linealean bihurtzeko diseinatutako elementu mekanikoak dira (1. irudia). Oso erabiliak dira industria-aplikazioetan, hala nola makina-erremintetan eta automatizazio-sistemetan, non posizionamendu-zehaztasun handia eta mugimendu-eraginkortasuna funtsezko aldagaiak diren (Li *et al.*, 2023). Elementu mekaniko hauen ezaugarri nagusietako bat pisten artean biraka dabiltzan bolak dira. Hauek, azkoin eta torlojuaren arteko irristadurak txikitzen dituzte, marruskadura indarrak txikituz eta potentzia galerak txikituz. Potentzia-torlojuekin alderatuz, efizientzia handiko elementuak direnez, elementu hauek oso erabiliak dira industrian (Zhao *et al.*, 2019).

Bolen mugimenduaren ezagutzea boladun torlojuen errendimendua ulertzeko funtsezko ezaugarria da. Mekanismo hauetan, bolaren zinematika deskribatzen duten bi parametro nagusi daude: orbita-abiadura (ω_m) eta bolak bere ardatzarekiko duen biraketa-abiadura (ω_R).

Hasierako ikerketetan, Levit (Levit, 1963) eta Drozdov (Drozdov, 1984) boladun torlojuaren zinematika aztertu zuten, bolen eta ibilbideen arteko kontaktu-gune osoan irristatzerik ez zegoela suposatuz. Hipotesi horrek esan nahi zuen boleak irristatu gabe biratzen zutela pistetan zehar. Beranduago, Lin *et al.*-k (Lin *et al.*, 1994) boladun torlojuen zinematika aztertzeko metodo teoriko bat aurkeztu zuten Frenet-Serret koordinatuak erabiliz.

3 Ikerketaren muina

3.1 Formulazio teorikoa

Formulazioaren garapen osoa lan honetako autoreek (Alberdi *et al.*, 2025) artikuluan argitaratutako jatorrizko lanean ikus daiteke. Atal honetan, garapen horren laburpena aurkezten da.

Analisi zinematikoak bolaren eta gainerako osagaien abiadura absolutua kalkulatzeko du helburu, kontaktuaren sistema koordinatuetan. Boladun torlojuen ezaugarri nagusia den geometria helikoidalak kalkulu espazialaren konplexutasuna dakar, eta hori kudeatzeko, hainbat koordenatu-sistema erabiltzen dira. Horien artean, Frenet-Serret koordenatu-sistema erabiltzea funtsezkoa da, eta horretarako, transformazio-matrizeak baliatzen dira.

Garapenaren lehen urratsa, bola eta barne zein kanpo pisten arteko kontaktu puntuen posizio-bektoreak kalkulatzeko da. Ondoren, bektore horiek denborarekiko deribatzen dira, elementu bakoitzaren bilakaera aztertzeko, eta azkenik, abiadura absolutuak kalkulatu dira.

Bolaren orbita-abiadura eta biraketa-abiadura definitzeko, bolaren eta ibilbideen arteko abiadura absolutua berdindu behar da. Kontaktuan dauden abiadura-bektoreak 2 irudian ikus daitezke. Barneko pistaren eta bolaren abiadura-osagaiak berdintzen direnean, hurrengo ekuazioa lortzen da:

$$\underbrace{\omega_m (r_m - r'_i \cos \alpha_i) \cos \psi}_{\text{Pistaren errotazioa}} + \underbrace{\frac{\omega_m L}{2\pi} \sin \psi}_{\text{Pistaren translazioa}} = \underbrace{\omega_R r'_i (\cos \beta \cos \beta' \cos \alpha_i + \sin \beta \sin \alpha_i)}_{\text{Bolaren errotazioa}} \quad (1)$$

Era berean, bolaren eta kanpoko kontaktuko ibilbidearen translazio-abiadurak berdintzen direnean, hurrengo adierazpena lortzen da:

$$\underbrace{(\omega - \omega_m) (r_m + r'_o \cos \alpha_o) \cos \psi}_{\text{Pistaren errotazioa}} + \underbrace{\frac{(\omega - \omega_m) L}{2\pi} \sin \psi}_{\text{Pistaren translazioa}} = \underbrace{\omega_R r'_o (\cos \beta \cos \beta' \cos \alpha_o + \sin \beta \sin \alpha_o)}_{\text{Bolaren errotazioa}} \quad (2)$$

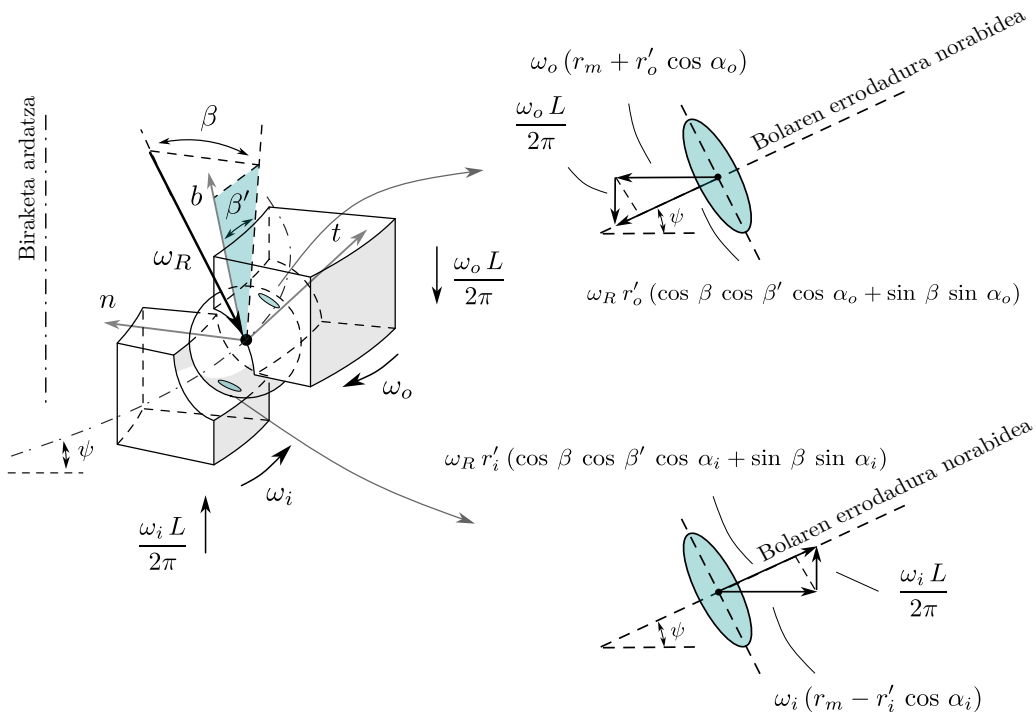
Ekuazio-sistema honetan ω_m eta ω_R kontsideratuz eta aldagai hauek sistematik askatuz, orbita-abiaduraren eta biraketa-abiaduraren kalkulatzeko behar diren ekuazioak lortzen dira.

$$\omega_m = \omega \left(1 + \frac{r'_i ((r_m + r'_o \cos \alpha_o) \cos \psi + (L/2\pi) \sin \psi) (\cos \beta \cos \beta' \cos \alpha_i + \sin \beta \sin \alpha_i)}{r'_o ((r_m - r'_i \cos \alpha_i) \cos \psi + (L/2\pi) \sin \psi) (\cos \beta \cos \beta' \cos \alpha_o + \sin \beta \sin \alpha_o)} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\omega_R = \omega_m \left(\frac{(r_m - r'_i \cos \alpha_i) \cos \psi + (L/2\pi) \sin \psi}{r'_i (\cos \beta \cos \beta' \cos \alpha_i + \sin \beta \sin \alpha_i)} \right) \quad (4)$$

Ikus daitekeenez, barneko eta kanpoko arrastoen abiadura-osagaiak bi terminoz osatuta daude. Lehenengo terminoa torlojuaren biraketa-mugimenduari dagokio, eta bigarrena mugimendu translazionalari. Bi osagai horiek kontaktuko abiadura osoan duten eragina 2. irudian erakusten da. Orain arte, boladun torlojuen zinematika askatzen den formulazioan bi termino horiek ez dira kontuan hartu. Hala ere, helize-angelua ψ handitzean, $\sin \psi$ lera hurbiltzen da, eta horren ondorioz, mugimendu translazionalari lotutako terminoa gero eta garrantzitsuago bihurtzen da ekuazioetan.

2. Irudia: Higiduraren konposaketa bektoriala



3.2 Prozedura esperimentalak

Prozedura esperimentalaren helburua proposatutako formulazio teorikoa balioztatzea da, boladun torlojuen bolen orbita-abiadura neurtuz. Esperimentu-prozeduran honako hipotesi hau egiten da: bolaren orbita-abiaduraren (ω_m) eta torlojuaren abiadura angeluarraren (ω) arteko erlazioa, bolaren orbita-desplazamenduaren (θ_m) eta torlojuaren desplazamendu angeluarraren (θ_s) arteko erlazioaren berdina da:

$$\frac{\omega_m}{\omega} = \frac{\theta_m}{\theta_s} \tag{5}$$

Hipotesi honek neurtzeko prozedura sinplifikatzen du, izan ere ez da abiadura zuzenean neurtu behar. Honen ordez, nahikoa da torlojuaren biraketa jakin baterako bolaren orbita-desplazamendua neurtzea.

Saiakuntza-bankuaren deskribapena

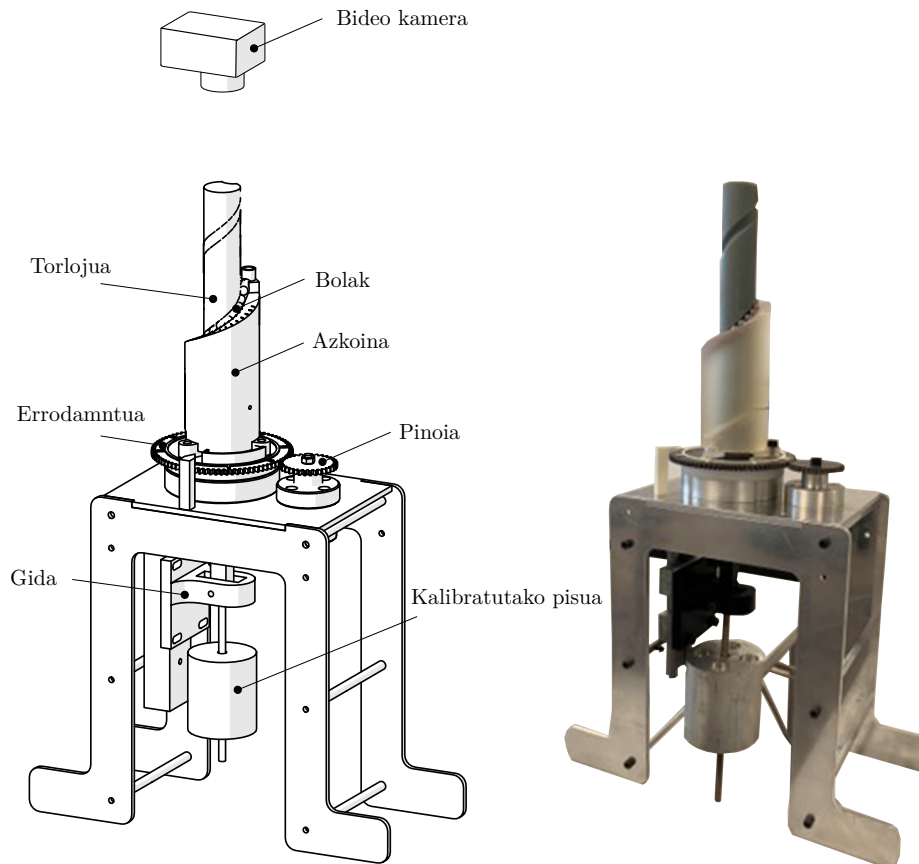
Bolaren orbita-desplazamendua neurtzeko, 3. irudian ikusten den neurritik diseinatutako saiakuntza-banku bat diseinatu eta fabrikatu da. Saiakuntza-bankuak honako osagai hauek ditu:

- Egitura: Azkoina muntaiaren goialdean kokatzen da, elementu zilindriko batek eutsita. Elementu honek azkoinaren biraketa ahalbidetzen du, desplazamendu axiala mugatuz.
- Torlojua eta gida lineala: Torlojua gida lineal bati dago lotuta, biraketa-mugimendua saihestuz. Horrela, azkoinaren biraketak torlojuaren mugimendu lineala ekartzen du, boladun torlojua simulatuz.
- Biraketa-mekanismoa: Azkoinaren biraketa engranaje eta pinoi mekanismo batek kontrolatzen du. Pinoia eskuz birarazten da gurpil baten bidez, eta desplazamendu angeluarra brida graduatu baten bidez kontrolatzen da.
- Bolen kargatzea: Bolak kargatzeko, 10 kg-ko pisu kalibratu bat torlojuari lotzen zaio. Pisu hori zuzenean torlojutik eskitzen da, lerrokatze-akatsak saihesteko, karga uniforme bermatuz.
- Bideo-kamera: Bideo-kamera bat bankuaren goialdean kokatzen da, desplazamenduaren irudiak grabatzeko. Kameraren kokapena arreta handiz zehazten da, grabatzen diren fotogramak biraketa-planorekiko perpendikularra izan daitezen.

Prozedura esperimentalaren deskribapena

1. Boladun torlojuaren muntaketa prestatzea:
 - Bola guztiak azkoinaren eta torlojuaren artean kokatu, banaketa uniforme bermatuz. Ondoren, aurrekarga aplikatu pisu kalibratuak erabiliz. Aurrekarga honek elementuen arteko jakua kentzen du, biraketa mugimendu leuna eta uniforme ziurtatzeko.
2. Markatzea eta kalibrazioa:
 - Bola bat aukeratu eta margo gorri batekin markatu. Bola markatua izango da orbita-desplazamendua neurtzeko erabiliko den erreferentzia.
3. Azkoinaren biraketa:
 - Azkoina eskuz birarazi pinoiari lotutako gorpila erabiliz. Mugimendua leuna eta uniforme izan behar da, neurketen koherentzia bermatzeko.
4. Datuen bilketa:
 - Kamera kokatu, bola markatua zehaztasun handiz grabatzeko, azkoinaren biraketa osoan zehar.
 - Bideo-kamera konfiguratu, 25 fotograma segundoko (fps) grabatzeko. Fotograma-tasa altu honek bolaren biraketa-mugimendua argi aztertzea bermatzen du.
5. Datuen prozesatzea:
 - Datuen prozesatzeko garapen automatizatu bat sortu da, irudien analisi-algoritmo baten bidez. Modu honetan, desplazamenduak automatikoki neurtzen dira, erroreak eta prozesaketaren denbora gutxitzeko.

3. Irudia: Saiakuntza-bankua



3.3 Emaitzak

Neurketa esperimentalak

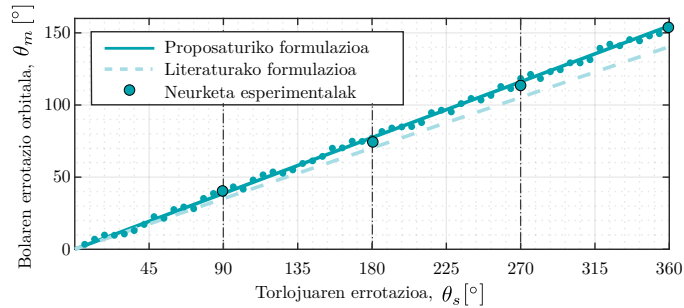
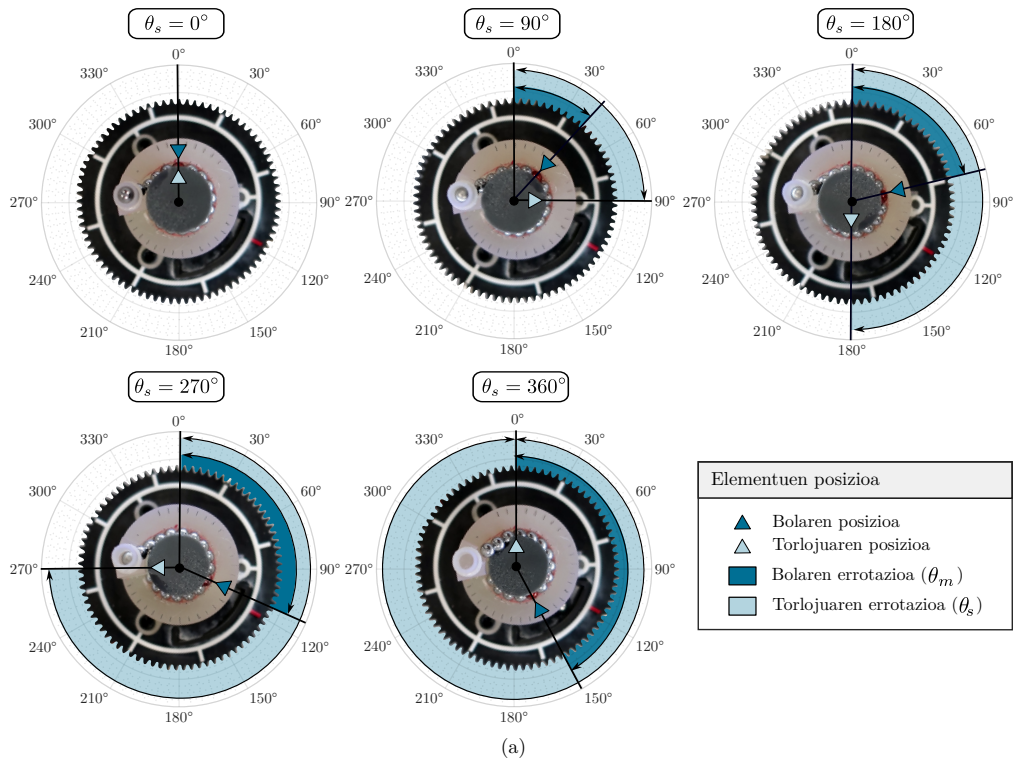
4.(a) irudian, esperimentu-prozeduraren bidez lortutako neurketak erakusten dira. Irudi honetako adibidea 25°-ko kontaktu-angelua eta 40°-ko helize-angelua dituen geometriari dagokio.

Irudiak bolaren orbita-desplazamenduaren bilakaera erakusten du azkoinaren hainbat biraketa angelurako. Irudi bakoitza azkoina 90° biratzean lortzen da, eta bolaren orbita-desplazamendua, lehen aipaturako irudien analisi-algoritmoaren bidez neurtzen da.

4.(b) irudian, neurketa esperimentalak formulazio teorikoekin alderatzen dira. Markatzaile zirkularrek esperimentalki lortutako balioak adierazten dituzte, eta 4.(a) irudian erakutsitako kasu zehatzak markatzaile handiagoekin nabarmendu dira, grafikoaren interpretazioa errazteko.

Emaitzek adierazten dutenez, esperimentu bidez lortutako datuak lan honetan proposatutako formulazioarekin bat datoz. Aldiz, literaturan aurretik proposatutako formulazioek bolaren orbita-errotazioa gutxienesten dute. Ondorioz, emaitza esperimentalek garatutako formulazio berriaren baliozkotasuna berresten dute.

4. Irudia: Bolaren orbita-biraketaren eboluzioa torlojuaren angulu-biraketarekiko



(b)

Formulazio teorikoa eta neurketen arteko konparaketa

5. irudiak helize-angeluak bolaren orbita-abiaduran duen eragina erakusten du. Efektuaren ikuspegi orokorra izateko, y ordenatuen ardatza, literaturan sarri erabiltzen den dimentsio gabeko abiadura-ratio aldagaia ω_m/ω erabiliz grafikatu da.

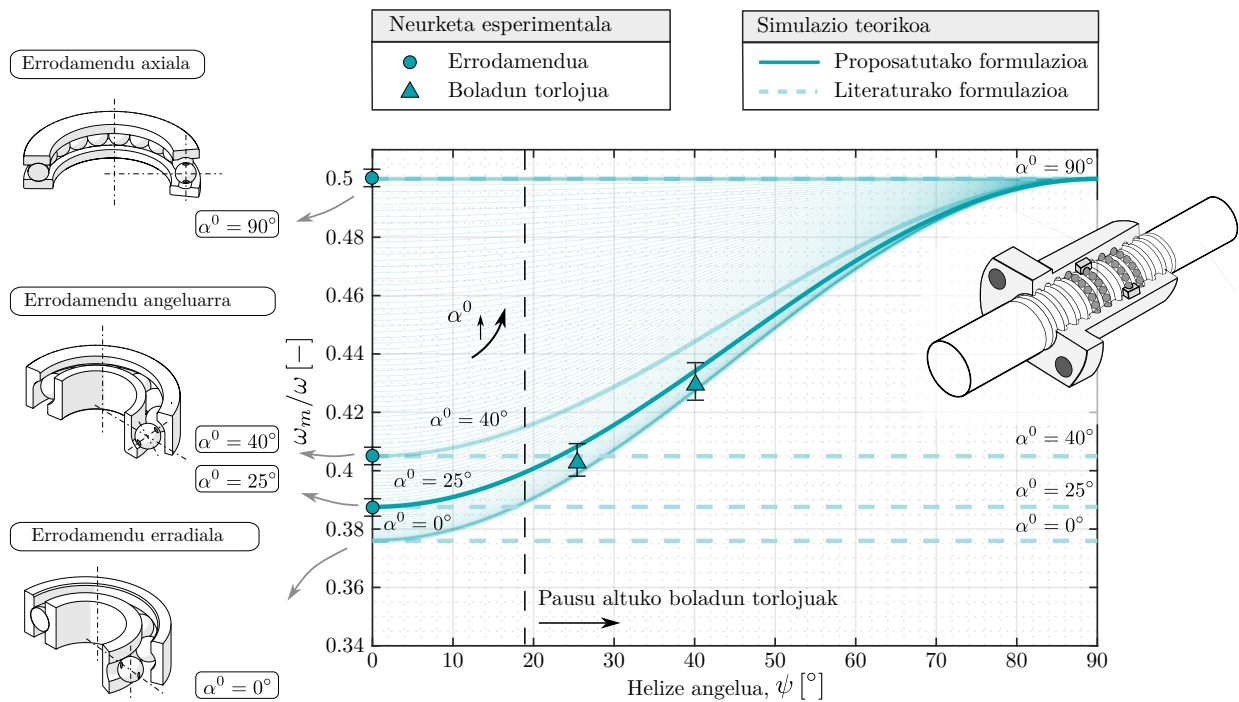
Helize-angelua zero denean, torlojuaren pausua ere nulua da, eta ondorioz, osagaiaren portaera boladun errodamendu batekin parekagarria da. Irudian hiru motatako errodamenduak bereizten dira, helize angelua zero den kasurako. Kasu bakoitza kontaktu-angulu espezifiko batez ezaugarritzen da: errodamendu erradiala, angelu-dun errodamendua eta errodamendu axiala. Abiadura-ratio baxuena errodamendu erradialak du, gutxi gorabehera 0,378 balioarekin, eta altuena errodamendu axialak, 0,5 balioarekin. Errodamendu angeluarra bi balio hauen artean kokatzen da. Ondoriozta daiteke kontaktu-angeluak eragin handia duela bolaren abiaduran.

Helize-angelua zero baino handiagoa denean, kasua boladun torloju bati dagokio. Irudiak erakusten duen moduan, helize-angelua handitzen den heinean, lan honetan proposatzen den ekuazioarekin, erantzunak 0,5 baliorantz jotzeko joera du.

Aldiz, literaturan erabiltzen den ekuazioaren arabera, helize-angeluaren aldaketek ez dute eraginik abiadura-ratioan. Emaitza kontrajarria da proposatutako formulazioan eta esperimenduaren behatutako joerekin. Irudian agertzen diren puntuak lan esperimentaletik lortutako emaitzak erakusten dituzte. Ikusten den moduan, neurketek lan honetako ekuazioaren joera jarraitzen dute, eta helize-angelua handitu ahala, abiadura-ratioa 0.5 baliorantz gerturatzen da. Tendentzia honek lan teorikoa balioztatzen du, literaturako formulazioaren eta proposatutakoaren arteko ezberdintasun nabarmenak erakutsiz.

Konbentzionalki, literaturan aztertutako boladun torlojuak 10° -tik beherako helize-angeluak izaten dituzte. Baldintza horietan, literaturan proposatutako formulazioak aurreikusitako kalkulu-akatsa minimoa da. Hala ere, abiadura handiko aplikazioetan erabiltzen diren ibilbide handiko boladun torlojuetan, literaturako formulazioaren kalkulu-akatsa nabarmen handiagoa bihurtzen da.

5. Irudia: Unibertsitateek kudeatutako funtsak



4 Ondorioak eta etorkizunerako norabidea

Tradizionalki, literaturako formulazioak torlojuaren biraketak sortutako abiadura-osagaia hartu izan du kontuan, azkoinaren mugimendu translazionala kalkulueta kontsideratu gabe. Formulazio berriak hutsune hori betetzen du mugimendu translazionalaren eragina ekuazioetan txertatuz, boladun torlojuen zinematikaren kalkulu zehatzagoa eskainiz. Proposatutako ereduaren eta literaturan erabiltzen den formula tradizionalaren arteko konparazioak argi erakutsi du azken honek ω_m gutxiesten duela, bereziki helize-angelua handitu ahala.

Proposatutako formulazio teorikoa balioztatzeko, saiakuntza-banku berritzaile bat eta neurketa-teknika bat garatu dira. Teknika honek orbita-abiadura ω_m kalkulatzeko du espermentalki, bolaren orbita-desplazamenduaren eta torlojuaren biraketaren arteko erlazioa neurtuz. Ezarritako konfigurazioarekin lortutako emaitza espermentalak formulazio berriak aurreikusitako balioekin bat etorri dira, horrela bere baliozkotasuna berretsiz.

Sarreran aipatu den moduan, bolaren zinematika funtsezko aldagai bat da boladun torlojuetako hainbat propietate mekaniko aztertzeko, hala nola potentzia-galerak, bibrazioen analisia, bolen pasatze-maiztasuna eta higadura-fenomenoak. Orain arte erabili den formulazioan akatsak daudenez, oinarri horretan garatutako aurreko ikerketak zinematika-eredu desegoki bati lotuta daudela ondorioztatu da.

Ikerketa-lan honetan proposatutako formulazio berriak propietate mekaniko horietan duen eragina kalkulatzeko funtsezkoa da. Horretarako, zinematikaren kalkuluan egindako sinplifikazioek ekarritako erroreak eta mugak aztertu behar dira, etorkizuneko ikerketetarako bide berriak irekitzea ahalbidetzeko. .

Erreferentziak

- Alberdi, Pello, Aitor Arana, Aitor Oyanguren, Jon Larrañaga, eta Ibai Ulacia. 2025. Redefining ball screw kinematics: Analysing the limitations of traditional formulations for orbital and angular speed. *Mechanism and Machine Theory* 205.105882.
- Bertolino, Antonio Carlo, Andrea De Martin, Stefano Mauro, eta Massimo Sorli. 2023. Exact formulation for the curvature of gothic arch ball screw profiles and new approximated solution based on simplified groove geometry. *Machines* 11.261.
- Drozdov, Y.N. 1984. Calculating the wear of a screw and nut transmission with sliding friction. *Soviet Engineering Research* 4.6–8.
- Jones, A. 1960. A general theory for elastically constrained ball and radial roller bearings under arbitrary load and speed conditions. *Journal of Basic Engineering* 91.
- Levit, G.A. 1963. Calculations of recirculating ball screw and nut transmissions. *Machines and Tooling* 34.9–16.
- Li, Changyou, Mengtao Xu, Wenjun Song, eta Hongzhuang Zhang. 2023. A review of static and dynamic analysis of ball screw feed drives, recirculating linear guideway, and ball screw. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 188.104021.
- Lin, M. C., B. Ravani, eta S. A. Velinsky. 1994. Kinematics of the Ball Screw Mechanism. *Journal of Mechanical Design* 116.849–855.
- Wei, Chin Chung, eta Jen Fin Lin. 2003. Kinematic analysis of the ball screw mechanism considering variable contact angles and elastic deformations. *Journal of Mechanical Design* 125.717–733.
- Zhao, Jiajia, Mingxing Lin, Xianchun Song, eta Qizhen Guo. 2019. Investigation of load distribution and deformations for ball screws with the effects of turning torque and geometric errors. *Mechanism and Machine Theory* 141.95–116.

5 Eskerrak eta oharrak

Lan honen edukia Mechanism and Machine Theory aldizkarian aurkeztuko den ekarpenetik eratorria da. Izenburu originala "Redefining Ball Screw zinematics: Analyzing the Limitations of Traditional Formulations for Orbital and Angular Speed" da. Egileak: Pello Alberdi, Aitor Arana, Aitor Oyanguren, Jon Larrañaga eta Ibai Ulacia.

Autoreek eskerrak eman nahi dizkiote Shuton S.A enpresari eta Eusko Jaurlaritzari proiektuaren finantzaketa partzialagatik. Ikerketa lan hau PUE programako SCALEROLL (ref. PUE_2020_1.0011), Elkartek programako BISUM II (ref. KK-2024/00048) eta Hazitek programako PREVARHU (ref. ZL-2022/00996 and ZL-2023/00617) proiektuetatik finantzatua izan da.