

Szerszámrezgés diagnosztika intelligens szerszámtartó alkalmazásával

Tool Vibration Diagnostics Using an Intelligent Toolholder

MEZŐ Péter Bálint¹, Dr. JACSÓ Ádám²

^{1,2}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Gyártástudomány és Technológia Tanszék,
cím: H-1111 Budapest Műegyetem rakpart. 3.,
tel: +36 1 463 1875
e-mail: ¹mezopeterbalint@edu.bme.hu, ²jacso.adam@gpk.bme.hu
honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

This study presents the vibration-diagnostic capabilities of the Schunk iTENDO² intelligent toolholder and its impact on process monitoring and optimisation. Four case studies were conducted to evaluate its performance. Our findings show that the sensor integrated into the iTENDO² toolholder enables low-noise, high-resolution vibration measurements, which support the generation of more accurate stability diagrams and the development of robust tool-condition monitoring algorithms.

Keywords: intelligent toolholder, MEMS sensors, Schunk iTENDO², chatter diagnostics

Kivonat

A jelen tanulmány a Schunk iTENDO² intelligens szerszámtartó rezgésdiagnosztikai képességeit és a megmunkálás felügyeletre és optimalizálásra gyakorolt hatását mutatja be. Négy esettanulmányon keresztül végeztünk kísérleteket. Az eredmények igazolták, hogy az iTENDO² szerszámtartóba integrált szenzora zajmentes, nagy felbontású rezgésmérést tesz lehetővé, ami pontosabb stabilitási diagramok és robusztus szerszámfelügyeleti algoritmusok kialakításához vezet.

Kulcsszavak: intelligens szerszámtartó, MEMS szenzorok, Schunk iTENDO², rezgésdiagnosztika

1. BEVEZETÉS

A forgácsoló szerszámgépek rezgéseinek mérése már hosszú ideje a karbantartás, a folyamatfelügyelet és a folyamatoptimalizálás egyik legjobban kutatott területe. Karbantartás esetén a gép alkatrészeinek meghibásodására tudunk következtetni a frekvenciaanalízis elvégzésével. A forgácsoló szerszám által keltett rezgés már szabad füllel is hallható, továbbá az elkopott szerszám esetében ez a hanghatás felerősödik, amely a folyamatfelügyelet során hasznos. A szerszámrezgés egy öngerjesztett rezgés, amely a munkadarab és a szerszám kölcsönhatásából származik [1]. A szerszámrezgés jelenségéhez köthető a felületi minőség és a méretpontosság romlása, illetve a szerszámélettartam csökkenése és az ebből származó termelékenységi és minőségi mutatókat is negatívan befolyásolja [2].

A szerszámrezgéseknek három típusát különböztetjük meg: szabadrezgés, kényszerített rezgés, és önfenntartó rezgés [3]. A szabadrezgés jellemzően ütközések vagy folyamatbeli impulzusok hatására jön létre, míg a kényszerített rezgést a mechanikai rendszer periodikus gerjesztései, mint például a szerszám radiális ütése idézi elő [4]. Ez utóbbi a stabilitási diagramokon akár oszlopszerű stabil tartományokat, úgynevezett szerszámütés által indukált stabil tartományokat (az angolszász terminológiában „TI-tongue”, azaz „Tool Irregularity induced stable tongue”) is kialakíthat [5]. E kettő rezgés okát és keletkezésének helyét meg lehet határozni, ezért megfelelő műszaki intézkedésekkel kialakulásuk elkerülhető, illetve hatásuk csökkenthető [6]. Ugyanakkor az önfenntartó rezgés egy olyan nehezen formalizálható rezgésjelenség, amely a forgácsolási rendszer dinamikai instabilitásából ered. A rezgésben jelen lévő specifikus öngerjesztő mechanizmustól függően az önfenntartó rezgés (angolul chatter) három típusra bontható fel [4]: a súrlódásos öngerjesztett

rezgésre, a módus-csatolt öngerjesztett rezgésre és a regeneratív öngerjesztett rezgésre. A súrlódásos öngerjesztett rezgést a szerszám és a munkadarab közötti kölcsönös súrlódás okozza, amely a forgácsolási sebességgel megegyező irányban lép fel [4].

A módus-csatolt öngerjesztett rezgés két természetes rezgési módus összekapcsolódása révén jön létre, amely a rezgő elemek két különböző irányú merevsége közötti kismértékű különbségből adódik. A forgácsolási folyamatokban leggyakrabban előforduló és legkárosabb típus a regeneratív öngerjesztett rezgés [4]. Ennek tudományos alapja a dinamikus forgácsvastagság változása: a szerszám rezgése hullámos felületet hagy maga után, amelyet a következő szerszámél vagy fordulat során újra megmunkál [8]. A két egymást követő vágási nyom közötti fáziskülönbség instabil erőingadozást idéz elő, ami a rezgés amplitúdójának exponenciális növekedését eredményezi [7]. Ezt a folyamatot matematikai szempontból késleltetett differenciálegyenletekkel (DDE) írják le, ahol a jelenlegi állapot a korábbi időpillanatoktól függ [7], [9]. A regeneratív szerszámrezgés stabilitási határait stabilitási diagramokon (SLD) szemléltetik a főorsó-fordulatszám és a fogásmélység függvényében [5].

A stabilitásvesztés típusa szerint megkülönböztetünk Hopf-típusú instabilitást és periódus duplázódást (angolul period doubling, avagy flip chatter), ahol az utóbbi jelenség főleg megszakított forgácsolási feltételek mellett jellemző [8]. A modellezés során gyakran alkalmazott mechanikai egyszerűsítés a „fagyasztott szerszám-munkadarab kapcsolat” (frozen CWE) feltételezése, azonban a szerszámütés és a kényszerrezgések figyelembevétele váratlan stabilitási oszlopok, a TI stabilitási nyelvek megjelenéséhez vezethet [5]. A fellépő rezgések hatására a megmunkált felületen jellegzetes hullámossági mintázatok (waviness marks) jelennek meg, amelyek topográfiai elemzése kulcsfontosságú a rezgésért felelős frekvencia azonosításához [10].

A rezgésmérő szenzorok kulcsszerepet töltenek be a forgácsolási folyamat dinamikájának nyomon követésében és a szerszámrezgések pontos mérésében. Ezek a szenzorok elsősorban gyorsulásmérő szenzorok, amelyek képesek a szerszám vagy a munkadarab rezgéseit nagy frekvenciatartományban mérni, így lehetővé téve a rezgés amplitúdójának és frekvenciájának pontos detektálását. Gyorsulásmérésre gyakran alkalmaznak piezoelektromos szenzorokat, amelyek rendkívül érzékenyek és gyors válaszidejűek, ezért alkalmasak a dinamikus erőhatások és rezgések regisztrálására a megmunkálás során. Ezen túlmenően az erőmérő cellák szintén fontosak lehetnek, mivel a forgácsolási erők változásai közvetetten információt adnak a rezgések jelenlétéről, különösen a regeneratív rezgések hatásáról. A nagy sebességű, valós idejű adatok gyűjtésére alkalmas piezoelektromos erőmérők elősegítik a rezgésinstabilitás korai felismerését és lehetővé teszik a beavatkozást. A modern kutatásokban egyre inkább teret kapnak az optikai szenzorok és lézeres rezgésmérők is, amelyek érintésmentesen, nagy pontossággal képesek mérni a munkadarab vagy szerszám mozgását [11]-[14].

A rezgésalapú karbantartás szerepe napjainkra kulcsfontosságúvá vált, mivel a rezgésjelek gyors és megbízható feldolgozása közvetlen hatással van a gyártás biztonságára és hatékonyságára. Kutatások rámutattak, hogy a valós idejű rezgésadat-elemzés alapot teremt a prediktív karbantartáshoz, támogatja a hibák korai felismerését, és mesterséges intelligencia segítségével jelentősen lerövidíti a diagnosztikai időt [15]-[17]. A korszerű, akár alacsony fogyasztású MEMS alapú érzékelők alkalmazása tovább növeli a felügyeleti rendszerek hatékonyságát, míg az adatvezérelt karbantartási modellek gazdasági hasznot is biztosítanak a termelés és minőségirányítás integrálásával [18], [19].

A MEMS-alapú szenzoros szerszámtartók fúrás és marás során közvetlenül mérik a szerszám munkadarabbal való kölcsönhatásából származó rezgéseket, így a folyamat pontosabban jellemezhető, mint a korábban alkalmazott módszerekkel.

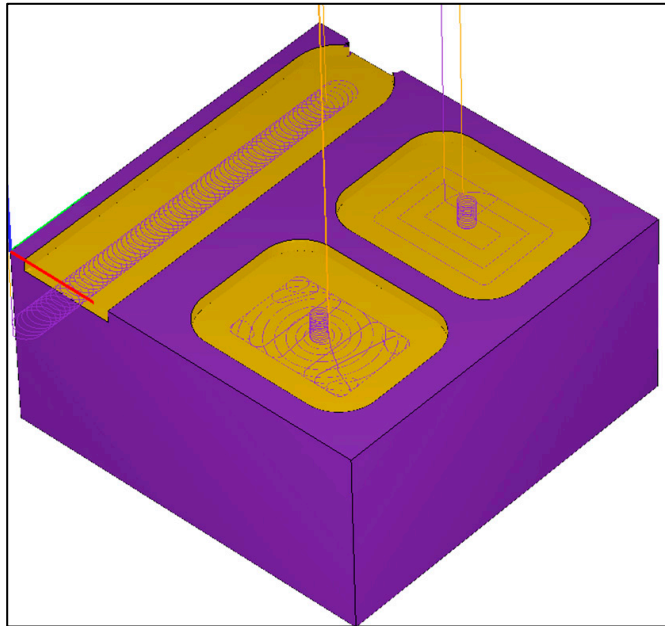
A Bécsi Műszaki Egyetemen Friedrich Bleicher és munkatársai a forgácsolási folyamat megfigyelésére egy szerszámtartó testébe integráltak egy három-komponensű gyorsulásmérőt, egy Bluetooth jeladót, és egy akkumulátort [20], [21]. Később a Schunk cég ezt a prototípust vásárolta meg és fejlesztette tovább egy integrálható alkalmazássá. Az így elkészült iTENDO² rezgésmérő szerszámtartó a Schunk által fejlesztett kereskedelmi forgalomban elérhető, szenzorintegrált, hidraulikus szorítású szerszámtartó megoldás, mely a digitális gyártás támogatására szolgál. A technológia lényege, hogy a szerszámtartóba beépített érzékelők segítségével valós idejű adatgyűjtés valósítható meg a megmunkálási folyamatok során, ezáltal elősegítve a folyamatmonitorozást és a minőségellenőrzést. Az iTENDO² és hasonló, érzékelőkkel integrált eszközök alkalmazása jelentős előnyt kínál a gyártási folyamatok automatizálásában és digitalizációjában, ugyanakkor a magas előállítási és integrációs költségek miatt egyelőre ezen rendszerek ipari elterjedése elsősorban a nagyobb vállalatokra korlátozódik, míg a kis- és középvállalkozások számára gazdasági akadályokat jelenthet a bevezetésük [22].

2. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A kutatás során három esettanulmány segítségével vizsgáltuk a Schunk iTENDO2 szenzor alkalmazhatóságát: (1) a főorsó üresjárati rezgéseinek meghatározása különböző fordulatszámokon, (2) a forgácsolási sebesség és a szerszámrezgések kapcsolatának vizsgálata trochoidális horonymarás során, valamint (3) különböző szerszám pályák összehasonlítása a szerszámrezgések szempontjából. A méréseket a Kondia 640B 3-tengelyes megmunkálóközponton hajtottuk végre. A kísérlet során egy $\varnothing 10$ mm-es, két élű keményfém szármarót fogtunk be az intelligens szerszám tartóba és AL6069 tömböt munkáltunk meg. A kísérleti elrendezést az 1. ábra mutatja be, míg a forgácsoló megmunkálások virtuális szimulációjának végeredménye a 2. ábrán látható.



1. ábra. Kísérleti elrendezés

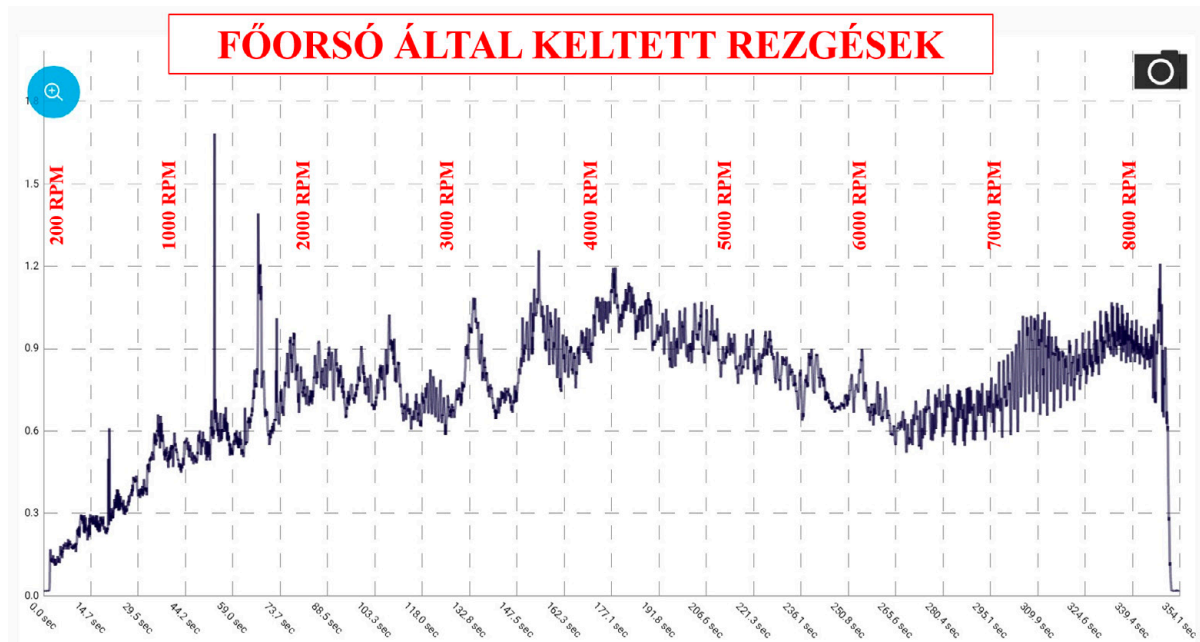


2. ábra. A vizsgált szerszám pályák

Az iTENDO² intelligens szerszám tartóból 0,1 s-os időközökkel érkező jeleket a szerszám tartóhoz tartozó Samsung Galaxy Tab A típusú tabletre rögzítettük a Schunk iTENDO² Easy Connect alkalmazás segítségével. Az applikáció felhasználóbarát kezelőfelülettel rendelkezik, amelyen keresztül például a csatlakoztatott intelligens szerszám tartó töltöttségi állapotát lehet nyomon követni. Továbbá az applikáció lehetővé teszi a tablettel történő gyors felvételek készítését, a mérési eredmények nagymennyiségű tárolást és a felvételek alapján történő trendeket kimutatását. A rendszer összeveti az aktuális rezgési amplitúdót egy előre meghatározott „nyugalmi” vagy ideális állapottal és ezt a különbséget Chatter Index néven viszonyításként az idő szerint ábrázolják, ahogyan az a 3-5. ábrákon is látható. Ez a Chatter Index egy rezgésalapú stabilitási indikátor, amely elsősorban folyamatoptimalizálásra, valamint trendfigyelésre és különböző megmunkálási állapotok összehasonlítására alkalmas. Ugyanakkor a pontos számítási módszert a gyártó sem részletezi, ezért kvantitatív elemzésre jelen munkában nem alkalmaztuk.

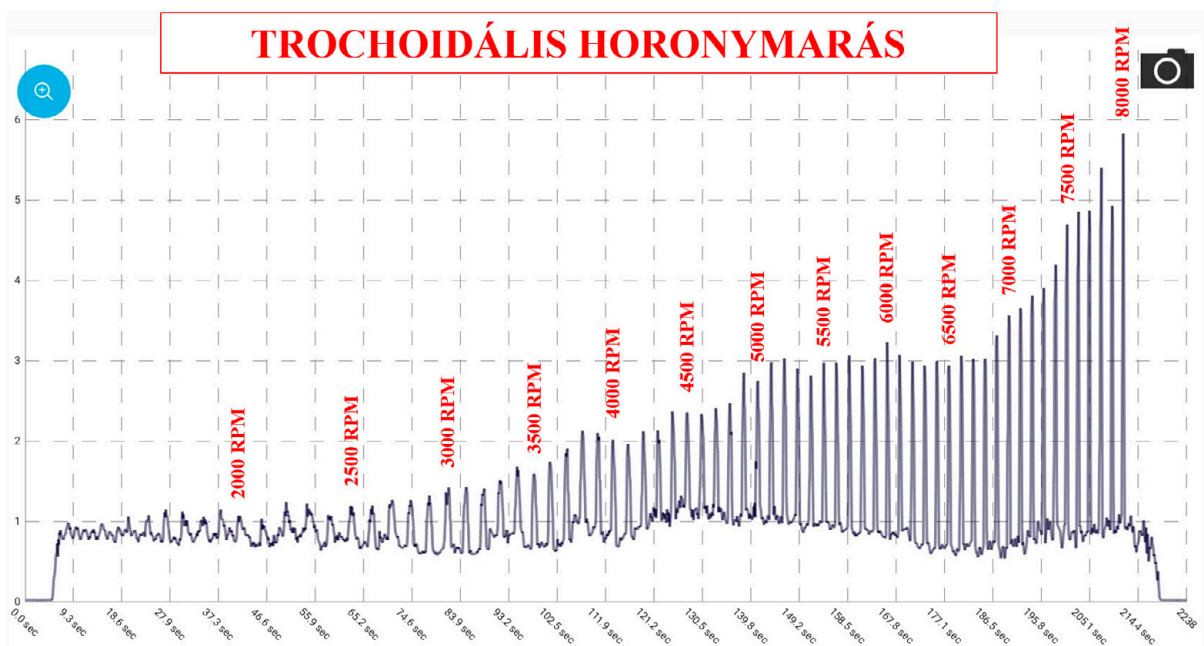
Először az üresjárati rezgések nagyságát térképeztük fel különböző fordulatszám-tartományokban. A főorsó-bejáratás során a fordulatszámot lépcsőzetesen növeltük 200 ford./min és 8000 ford./min között 50 ford./min lépésekkel, ahol az adott beállításokon a gép 2 s hosszan várakozott. A főorsórezgések 3. ábrán látható karakterisztikája egy olyan nem-monoton jelleggörbét rajzol ki, amely alapján stabil és instabil tartományokat azonosíthatunk. Az 1200 ford./min, 1700 ford./min, 3500 ford./min és 8000 ford./min fordulatszám környékén például egy-egy kiugró rezgéscúcsot láthatunk, ezért ezekre a fordulatszámokra ebből kifolyólag potenciálisan elkerülendő értékeként tekinthetünk. Ugyanakkor a 6000 ford./min és 7000 ford./min közötti intervallumban mérsékelt amplitúdót figyelhetünk meg. Ezen kívül a főorsó-bejáratás tesztet diagnosztikai tesztként is alkalmazhatjuk, mivel az időszakosan elvégzett pár perces teszt segítségével a szerszám gép főorsójának állapotáról kaphatunk vizuális visszajelzést.

A diagramok összevetésével a romló tendenciák felismerése válik lehetővé, amely mélyebb vizsgálatokat követelhet meg, ezért az alkalmazás potenciálisan a preventív karbantartás részeként is alkalmazható.



3. ábra. A főorsó üresjáratú rezgéseinek karakterisztikája

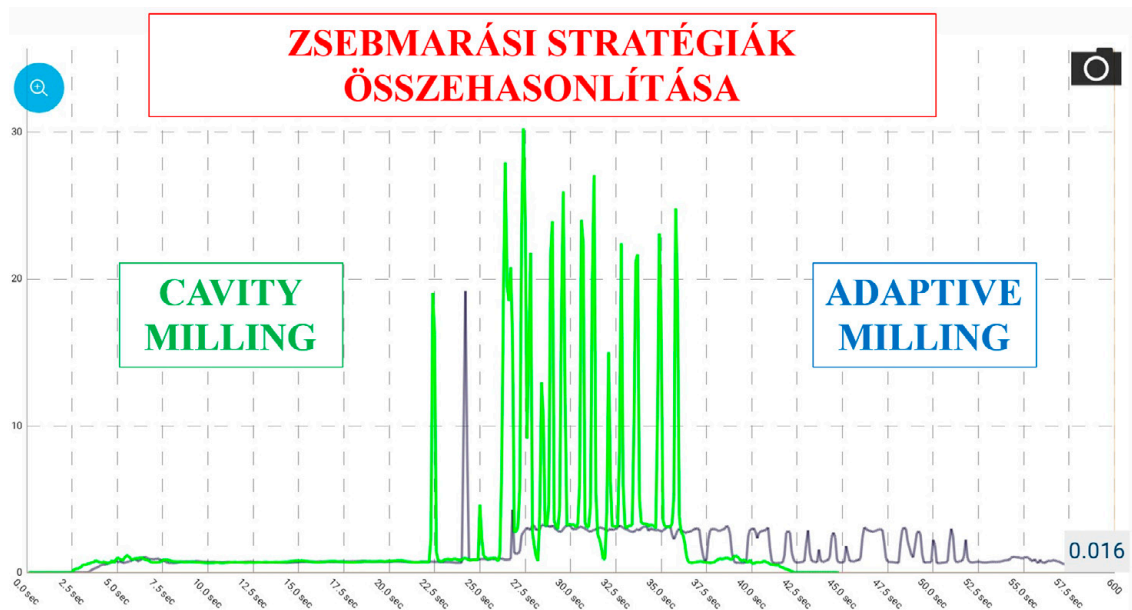
A forgácsolási paraméterek különböző mértékben, de hatással vannak a megmunkálás során keletkező rezgésekre és magára a termelékenységre. A második esettanulmányban a különböző fordulatszám mellett keletkező rezgéseket vizsgáltuk. Ehhez az alumínium tömbön 2 mm-es fogásmélységben és 0,01 mm élenkénti előtolás mellett horonymarást hajtottunk végre különböző fordulatszámokkal. A megmunkálás során a szerszám trochoidális pályán haladt végig, ahol egy kör megtétele után a fordulatszámot inkrementálisan növeltük 2000 ford./min és 8000 ford./min között 100 ford./min léptékkel. A mért rezgések ebben az esetben sem monoton növekedtek, ahogy az a 4. ábrán is látható. A főorsó bejáratáshoz hasonlóan itt is megfigyelhetők hasonló trendek, mint például a 6000-7000 ford./min fordulatszám közötti stabil rezgésintervallum és a legnagyobb fordulatszám mellett keletkezett a legnagyobb rezgési érték. Ez a vizsgálat kifejezetten akkor válik előnyössé, amennyiben a szerszámrezgések mértékére is ügyelve szeretnénk a termelékenységet növelni.



4. ábra. A horonymarás során különböző forgácsolási sebességek mellett keletkező rezgések

A trochoidális horonymarást követően az utolsó esettanulmányban két zsebmarási műveletet hajtottunk végre. Az első műveletben kontúrpárhuzamos szerszám pályával 2 mm mélyen 25%-os oldallépés mellett, 200 m/min forgácsolási sebességgel és 0,05 mm élenkénti előtolással egy 30 mm x 24 mm nagyságú zsebet

alakítottunk ki, míg a másodikban ugyanezekkel a paraméterekkel a Siemens NX tervezőszoftver CAM moduljának Adaptive Milling stratégiával készített szerszám pályáját vizsgáltuk. E kísérletek célja a zsebmarás kontúrparhuzamos pályáinak sarkos irányváltásai során a rezgésterhelés megfigyelése, valamint az NX CAM Adaptive Milling ciklus kiegyenlített terhelési profiljának értékelése volt. Az 5. ábrán láthatjuk a két megmunkálásának összehasonlítását a felvételek egymásra vetítésével, amely segítségével több megmunkálás egyszerre történő megjelenítésével jelenségek és trendek megfigyelésére is lehetőség nyílik. Az első kiugró érték a helikális mélyítés során keletkezett, amely egyforma volt a két stratégia esetében. Az azt követő kiugró értékek a kontúrparhuzamos stratégia esetén a négy sarok érintésénél keletkeztek, ahol a szerszám és a munkadarab kapcsolódási szöge lokálisan megnövekedett. Megfigyelhető, hogy a hagyományos zsebmarás magas rezgéssel, de feleannyi idő alatt végzett az adaptív zsebmaráshoz képest. Ezzel szemben az adaptív zsebmarás, a mélyítőmarás lépésének kivételével több mint tizedakkora rezgés mellett készítette el a zsebet, ezzel szabad szemmel is jól láthatóan jobb felületet állítva elő. Ez lehetőséget adna arra, hogy az adaptív marás esetén továbbra is alacsony rezgések mellett lényegesen nagyobb előtolási és forgácsolási sebességet alkalmazzunk, ezáltal magasabb termelékenységet elérve.



5. ábra. Az adaptív és hagyományos kontúrparhuzamos szerszám pálya megmunkálás összehasonlítása

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott kísérletek eredményei alapján az iTENDO² intelligens szerszám tartó zajmentes, nagy felbontású rezgésmérést tesz lehetővé, és megbízhatóan tárja fel a különböző megmunkálási stratégiák rezgésviszonyait. A főorsó-bejáratás, a trochoidális horonymarás és a zsebmarási vizsgálatok egyaránt rámutattak a stabil és kerülendő fordulatszám-tartományokra, valamint a pályastratégiák közötti karakteres rezgésbeli különbségekre. Az adaptív zsebmarás jelentősen alacsonyabb rezgésterhelése jól demonstrálta a terhelés kiegyenlített pályák előnyeit. A mérések alátámasztják, hogy az iTENDO² hatékony eszköz a rezgésdiagnosztikában és a folyamatoptimalizálásban egyaránt. A jövőbeli kutatások a forgácsolási paraméterkombinációk iTENDO² segítségével történő részletesebb feltérképezésére, a multiszenzoros integráción alapuló paraméteroptimalizálási módszerekkel való párosítására, valamint különböző rezgésmentes CAM-stratégiák kidolgozására irányulhatnak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 2025-1.2.7-HU-CN-PARTNER-2025-00015 azonosítójú, „Energiahatékony technológiák fejlesztése robotos megmunkálási folyamatokhoz” című projektjének és az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj (BO/00841/24/6) támogatásával, valamint a Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem támogatása alapján valósult meg. Továbbá hálával tartozunk a SCHUNK Intec Kft.-nek és Juhász Miklósnak a Schunk iTENDO² rendszer kísérletekhez történő rendelkezésre bocsátásáért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bártfai A. and Dombóvári Z., ‘Hangolható asztal optimális hangolásának kísérleti ellenőrzése és kompatibilis munkadarab tervezése’, *Gép*, vol. 75, no. 3–4, pp. 19–22, 2024, doi: 10.70750/GEP.2024.3-4.4.
- [2] M. Li, W. Zhao, L. Li, N. He, and G. Stepan, ‘Influence of milling stability on machined surface integrity and fatigue performance of Ti-6Al-4V titanium alloy’, *Eng. Fail. Anal.*, vol. 168, p. 109103, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.109103.
- [3] Y. Altintas and M. Weck, ‘Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding’, *CIRP Ann.*, vol. 53, no. 2, pp. 619–642, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8.
- [4] C. Yue, H. Gao, X. Liu, S. Y. Liang, and L. Wang, ‘A review of chatter vibration research in milling’, *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 32, no. 2, pp. 215–242, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
- [5] D. Hajdu *et al.*, ‘Stable tongues induced by milling tool runout’, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 206, p. 104258, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2025.104258.
- [6] X. Wei, E. Miao, and H. Ye, ‘Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability Considering Multiple Parameters in Milling’, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 23, no. 7, pp. 711–720, Jul. 2022, doi: 10.1007/s12541-022-00645-y.
- [7] Z. Qin, S. Jiang, S. Yin, Y. Sun, and M. Wang, ‘Chatter stability prediction methods in the machining processes: a review’, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 136, no. 7, pp. 2945–2985, Feb. 2025, doi: 10.1007/s00170-024-14971-0.
- [8] M. Sanz-Calle, A. Iglesias, L. N. L. de Lacalle, Z. Dombovari, and J. Munoa, ‘Optimal milling cutter helix selection for period doubling chatter suppression’, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 202, p. 104211, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2024.104211.
- [9] C. Song, Z. Peng, D. Zhao, and X. Jin, ‘A whole discretization method for milling stability prediction considering the discrete vibration velocities’, *J. Sound Vib.*, vol. 553, p. 117687, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jsv.2023.117687.
- [10] M. Gil-Inchaurza, X. Beudaert, J. A. Sanchez, J. Munoa, and Z. Dombovari, ‘Topography lobes diagram applied to identify waviness features induced by a single-frequency tool vibration in turning’, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 345, p. 119041, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2025.119041.
- [11] B. Jia, ‘Two-dimensional tool tip vibration measurement method with mirror optical fiber bundles in milling machines’, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 5, pp. 2189–2200, May 2022, doi: 10.1007/s12206-022-0403-4.
- [12] J. Lei, S. Mei, Q. Zhao, W. Qiu, L. Wan, and G. Wen, ‘At-dicnet: a novel framework based speckle pattern for non-contact micron-level tool vibration deformation precision measurement’, *J. Intell. Manuf.*, Nov. 2025, doi: 10.1007/s10845-025-02723-0.
- [13] X. Tao, Y. Zhao, and Y. Chen, ‘Vibration monitoring and health status recognition technology of machine tool electric spindle’, *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 72, no. 1, p. 102, Jul. 2025, doi: 10.1186/s44147-025-00672-2.
- [14] H. Zhang, D. Anders, M. Löser, S. Ihlenfeldt, J. Czarske, and R. Kuschmierz, ‘Non-contact, bi-directional tool tip vibration measurement in CNC milling machines with a single optical sensor’, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 139, p. 106647, May 2020, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106647.
- [15] M. Ntemi, S. Paraschos, A. Karakostas, I. Gialampoukidis, S. Vrochidis, and I. Kompatsiaris, ‘Infrastructure monitoring and quality diagnosis in CNC machining: A review’, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 38, pp. 631–649, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.06.001.
- [16] L. Martiri, P. Esmaili, and L. Cristaldi, ‘A Convolutional Neural Network for CNC Milling Machines Processes Classification’, in *2024 IEEE International Conference on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE)*, 2024, pp. 634–639. doi: 10.1109/MetroXRINE62247.2024.10796343.
- [17] M. F. Siddique, W. Zaman, M. Umar, J.-Y. Kim, and J.-M. Kim, ‘A Hybrid Deep Learning Framework for Fault Diagnosis in Milling Machines’, *Sensors*, vol. 25, no. 18, p. 5866, Jan. 2025, doi: 10.3390/s25185866.
- [18] C.-Y. Li *et al.*, ‘Design and Development of a Low-Power Wireless MEMS Lead-Free Piezoelectric Accelerometer System’, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3242016.
- [19] B. Mota, P. Faria, C. Ramos, and Z. Vale, ‘Review of manufacturing integration between production, maintenance and quality artificial intelligence systems’, *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 47, p. 100910, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jii.2025.100910.
- [20] F. Bleicher, C. M. Ramsauer, R. Oswald, N. Leder, and P. Schoerghofer, ‘Method for determining edge chipping in milling based on tool holder vibration measurements’, *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 101–104, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.100.
- [21] F. Bleicher *et al.*, ‘Tooling systems with integrated sensors enabling data based process optimization’, *J. Mach. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 5–21, Mar. 2021, doi: 10.36897/jme/134244.
- [22] P. Stavropoulos, D. Manitaras, C. Papaioannou, T. Souflas, and H. Bikas, ‘Development of a Sensor Integrated Machining Vice Towards a Non-invasive Milling Monitoring System’, in *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus*, K.-Y. Kim, L. Monplaisir, and J. Rickli, Eds, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 29–37. doi: 10.1007/978-3-031-18326-3_3.