

LÉZERES MÉRÉSEK ALKALMAZÁSA FORGÁCSOLÁSKOR I. – MONITORING ÉS A LÉZERES ÉRZÉKELŐK

Béres Miklós

*mérnök-tanár, Miskolci Egyetem, Fizika és Elektrotechnika Intézet, Fizika Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mechbere@uni-miskolc.hu*

Absztrakt

A cikk célja, hogy néhány példán keresztül felvázolja azokat a lehetőségeket, amelyeket a lézeres mérések kínálnak fúrás, marás és esztergálás vizsgálatára. Olyan munka eddig nem jelent meg, amely a klasszikus forgácsolási technikák esetén külön-külön igyekszik összefoglalni az egyes hagyományos forgácsolásleválasztási technológiákra vonatkozó méréseket. Nem titkolt célja, hogy a lézeres mérés-technika előnyeit és hátrányait is bemutassa, figyelembe véve a mérési körülményeket is. Mindezeket a forgácsolás felügyeletben való alkalmazhatóságának szem előtt tartásával kívánja bemutatni.

Kulcsszavak: LDV mérés-technika, szerszámgép állapotfelügyelete, forgácsolás vizsgálata

Abstract

The purpose of this article is to outline, through some examples, the possibilities that laser measurements offer for the study of drilling, milling, and turning. To date, no work has been published that seeks to summarize the measurements for each conventional metal cutting technology separately for classical cutting techniques. It is not a secret aim to present the advantages and disadvantages of laser measurement technology, also taking into account the measurement conditions. It intends to present all this with the applicability of cutting in supervision in mind.

Keywords: non-contact measurement, LDV, metal cutting monitoring, metrology, machining

1. Bevezetés

A gépgyártás-technológiában az elmúlt évtizedekben a technológiai folyamatok sokszínűbbé váltak, s nap mint nap számtalan új eljárás és új (vagy összetettebb) termék jelenik meg (Research and Markets [1],[2],[3],[4],[5]). Ez a jelenség ugyanakkor a hagyományos technológiai folyamatokra is kihat, hiszen az elvárt minőség, a megbízhatóság és a fokozott termelékenység megemelt szintjének ugyanúgy meg kell felelniük ezek a gyártási folyamatoknak [6],[7]. Különböző állapotfelügyeleti (monitoring) módszerek és eszközök segítenek a célok megvalósításában, melyek az egyes gyártástechnológiai műveleteknél egyre nagyobb szerepet kapnak [8].

Jelen cikk nem kíván foglalkozni a különböző monitoring technikákkal, azonban meg kell jegyeznünk, hogy mára több különálló terület jött létre. Egyes állapotfelügyeleti eljárások a szerszámgépet ellenőrzik (MCM - Machine Condition Monitoring), míg vannak amelyek közvetlenül a szerszámra vizsgálnak. Az előbbieket főleg az állapotfüggő karbantartásra (PdM - Predictive Maintenance) helyezik a hangsúlyt [9],[10],[11],[12], olyan adatokat szolgáltatva, amelyek jól kiegészíthetik a kockázat alapú karbantartási stratégiát (RBM - Risk Based Maintenance) (komoly gazdasági előnyt kínálva ezzel az alkalmazók számára). A másik csoportba tartozó technikák a szerszám termelékenység szempontjából

történő optimalizálására, vagyis a minőségi termelésben eltöltött hasznos munkaidejük maximalizálására koncentrál azáltal, hogy a szerszám állapotát vizsgálja [13],[14],[15]. Az előrejelző karbantartás olyan analitikai modellek segítségével elemzi a szenzoroktól érkező adatokat, amelyek az alkatrész, a gép vagy a folyamat állapotáról adnak becslést, míg az állapotalapú ellenőrzés gyakran korai figyelmeztető rendszerként működik. Az előrejelző karbantartási eljárások a gépi adatok gyűjtése és a gyakoribb mintavételezés révén kínálnak előnyt, míg az állapotalapú felügyeleti alkalmazások előnye a a több(féle) érzékelési bemenetből származik [16][17].

A szerszám állapotát figyelő rendszerek mellett magát az anyagleválasztást folyamatában is külön figyelemmel kísérhetjük. Ez a harmadik ellenőrző stratégia szorosan összefügg az előző felügyeletekkel [4],[7]. Sőt, adott esetben vezeték nélküli hálózati formában [18], [19] egészítik ki az előző két stratégiát.

Annak ellenére, hogy ma számos különböző érzékelő típus és mérési eljárás áll rendelkezésünkre, ezek mindegyike korlátokkal rendelkezik és maga a mérés továbbra is hibával terhelt [20], [21]. Azok a mérési módszerek tehát (így a lézeres is), amelyek a többivel szemben érzékenyebben reagálnak a vizsgált fizikai jellemzőre, ebből a szempontból határozott előnyt kínálnak [22], hiszen a kiértékelést egy nagyobb felbontású jelből lehet elvégezni. Ugyanakkor ezeknek jó része korábban maga a mérési módszer vagy a kiértékelés bonyolultsága, az egyedi felhasználási területe, vagy jelentős egyéb műszerigénye és költsége miatt nem terjedt el [23][24]. Mondhatjuk ezt szinte valamennyi optikai eljárásra is, egyedül talán a CCD-szenzoros érzékelők alkalmazása jelent kivételt [25]. A lézer, mint mérőeszköz közel egy évtizede még igen költséges eljárásként volt ismert [26], mára azonban az árak jelentős csökkenése és pl. az elektronikai iparban történő intenzív felhasználása révén az alkalmazási köre kiszélesedett. Ez az oka a nagyfelbontású kamerák, a helyi számítási feladatokat is ellátó intelligens eszközök vagy éppen a mikrovezérlők térhódítása [27] mellett a lézeres vizsgálatok gyakoribb használatának. Maga a lézer jelenleg is fejlesztés tárgya. Miniaturizálása és beágyazhatósága révén azonban további alkalmazási területek kerülnek előtérbe. A Li és társai által kifejlesztett integrált félvezető lézer például több sugarat használ egyszerre [28]. Ezzel a technikával az LDV jobban tudja elemezni a vizsgálat célpontjának különböző rezgési módusait. A korábbi fejlesztésekhez képest az új hatsugaras LDV-s lapkájuk olyan elektronikai beágyazott tulajdonságokat használ ki, amelyek segítenek csökkenteni az észlelési idő okozta veszteséget, növelik a jelstabilitást és csökkentik az egész rendszer méretét. Egy másik dolgozatukban is IC-lapra szerelt integrált LDV-vel foglalkoznak [29]. Az előzőkkel ellentétben itt egy olyan chipen lévő lézeres Doppler vibrométert mutattak be, amely termo-optikai fázismodulációra épülő serrodyne optikai frekvenciaváltóval rendelkezik. Az alacsony frekvenciatarományban, néhány 100 $\mu\text{m/s}$ -os mikrorezgésekig mérő, chipen lévő LDV-k a kereskedelmi forgalomban kapható LDV-khez hasonló felbontásban, és minőségben képesek lekérni a pillanatnyi elmozdulásokat és a sebességértékeket ezen a tartományon belül.

A TCM rendszerek mérés technikai szempontból sarkalatos pontja, hogy érzékenyek az érzékelők elhelyezésére, körülményeire, illetve azon készülékekre, amelyek segítségével a szerszámgépre (-be) rögzítésre kerülnek [30]. Rezgések vizsgálatánál a hagyományos mérés technikánál pl. az orsóházra helyezett vagy beágyazott rezgésérzékelők pontosabb jeleket kínálnak, mint azok, amelyek a munkadarabon, vagy a munkatérben helyezkednek el [31].

Mindenféleképpen ügyelni kell továbbá azokra a folyamatokra és eseményekre is, amelyek a forgácsolási ciklushoz tartoznak ugyan, mégis hibát okoznak a mérés értékelésében. Ez a lézeres mérések esetén ugyanúgy érvényes. Előfordult több esetben például, hogy a forgácsolási kísérletek során a vágási ciklus átmeneti szakaszában az elmozdulási jel időnként „elveszett” (drop-out) [32][33]. Különösen igaz LDV-vel történő mérésekre. Ekkor a visszavert jel olyan alacsony intenzitású válik, hogy az az elfogadható szint alá csökken, ezáltal maga a mérőjel szűnik meg, vagy válik értékelhetetlenné.

Ha a szerszám alakja valamilyen okból a lézer elé kerül, befolyásolja a visszavert jelet, és abban (mérhető) rendellenességet okoz. Ilyet lehet tapasztalni például fúrás esetén [33].

Részben ezen okok indokolják a bevett gyakorlatot, miszerint a lézeres mérőeszközöket általában nem önmagukban, hanem egyéb érzékelőkkel együtt használják [30], [32], [34]–[41]. Egyéb indokként szól emellett az is, hogy kiegészítő mérésekre van szükség a rendszer dinamikai modelljének megalkotásához is. Különösen fontos ez, amikor a dinamikai paraméterek forgácsolás közben változnak.

A monitoring technikák hasznosságát a szakirodalomban fellelhető különféle tapasztalati eredmények határozottan alátámasztják [6]. Az általuk optimalizált és korrigált vágási paraméterek segítségével a megmunkálási ciklusidő rövidülhet, és ezzel arányban csökkenthet a gyártási energiafogyasztás és a termelési költség.

2. Lézeres mérőeszközök a forgácsolás vizsgálatára

2.1. Lézeres fordulatszám mérők

A nem érintéses lézeres fordulatszám mérő általában infravörös fényt használ a tengely vagy a kerék vagy bármely más forgó tárgy forgási sebességének mérésére. A lézeres fordulatszám mérő működéséhez az szükséges, hogy a tárgy felületén legyen némi kontraszt a színben vagy a fényerőben. Ha nincs ilyen kontraszt, vagy ha a felület erősen polírozott, akkor egy jelölőt vagy egy darab papírt a felületre ragasztva foltot jelölünk a felületen. A fordulatszám mérő infravörös fénye a felületre esik, és visszaverődik a fordulatszám mérő detektorához. Az érzékelő észleli az objektum felületén lévő kontrasztfoltról visszavert fényimpulzusokat, és ezt számlálva képezi a jel frekvenciáját. Az időegységenkénti impulzusszám alapján kiszámolható az objektum forgási szögsebessége.

A műszer egy kifinomultabb, interferometrikus változata a lézer torziós rezgés mérő (LTV – Laser Torsional Vibrometer). A módszerről és a vele kapcsolatos mérésekről egy korábbi cikkben részletesen szót ejtettünk [33]

2.2. Trianguláris lézeres elmozdulásmérő

A háromszögelési elven alapuló lézeres elmozdulásmérők igen széles körben elterjedtek az utóbbi néhány évben, és az egy pontos lézeres háromszögelés-érzékelő jól alkalmazható a felületprofil mérésére [41], [42]. Gyors válasz idővel, egyszerű felépítéssel, jó ismételhetőséggel, nagy érzékenységgel és viszonylag széles működési tartománnyal rendelkeznek. A háromszög alapú kereskedelmi rendszerek a mérési tartományától és technikai megvalósításától függően az érzékelési tartomány pontossága 3 és 300 μm között változik.

Az interferometrikus elven működő elmozdulásmérőkkel szemben nagyon egyszerű módszert használ az elmozdulásmérésre. Érzékelési jellegét tekintve kicsit hasonlít a lézeres interferometrikus enkódeerekre, ahol azonban egy rács segítségével történik a mérés nehezen legyártható optikai konfigurációkat alkalmazva [43].

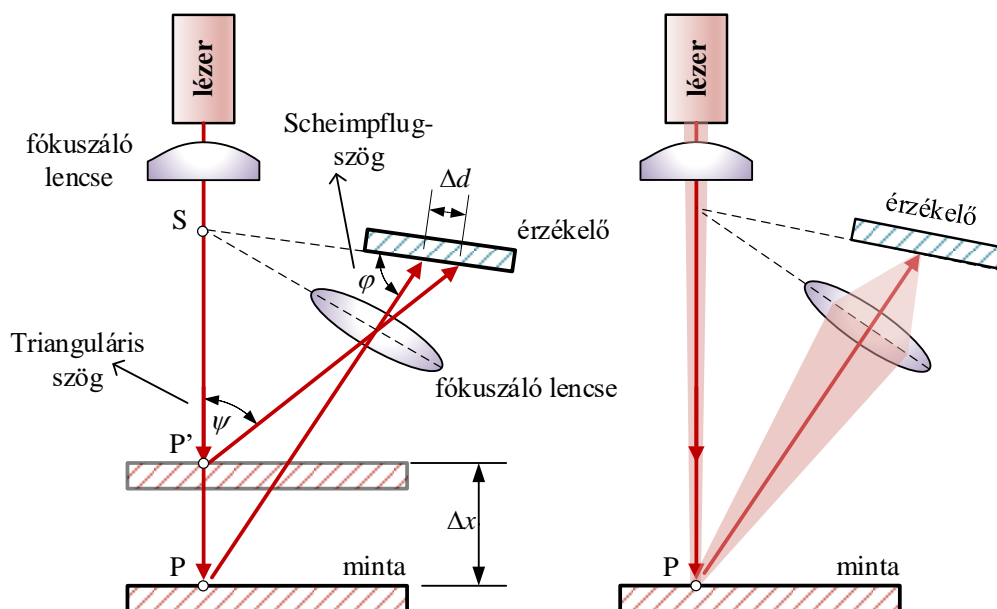
A háromszögelés szög számításal történő távolságmérést jelent. A mérési felületre egy lézerfoltot vetítünk (**1. ábra**). A fény egy része szétszóródik a felületről. A visszavert fényt CCD panelen fókuszálják. Ha a diffúz felületnek van olyan elmozdulásból származó összetevője, amely párhuzamos a rávetülő lézer irányával, akkor a felületen lévő fényfoltról visszaverődő fénynek a detektorlencse tengelyével párhuzamos és merőleges elmozdulás-összetevője van. A Scheimpflug-feltétel teljesülése esetén ez azonban egyirányú elmozdulásra transzformálható oly módon, hogy a detektor gyűjtőlencse csak a tengelyre merőleges komponensre lesz érzékeny. A Scheimpflug-feltétel szerint ugyanis ferde tárgysíkról

az objektív akkor ad a képsíkon megfelelő élességet, ha a lencse tengelysíkjának és a detektornak (mint képsíknak) a metszsvonala a lézersugár haladási vonalán és a leképező síkra merőlegesen (élességi sík) metszi egymást (az **1. ábra** bal oldalán S-el jelölt vetület). A detektor a leképezett fényfolt intenzitásmaximumának helyét számolja ki [44],[45]. Ennek pozíciója (referenciaponttól mért távolsága) a tárgy lézerrányú elmozdulásával összefüggő trianguláris szögtől függ. A képpont detektoron történő elmozdulásával meghatározható a felület lézer irányú elmozdulása.

A mérési bizonytalanság különböző lehetséges forrásai a szenzorgeometria, a lézersugár mérete és a lézerfény szóródás mértéke [46]. Utóbbi paraméter minden lézeres mérésnek is hibaforrása [47].

Kutatások során előfordult a fenti méréstípusnak a kétérzékelős változata is. Két külön látószöggel rendelkeznek, melynek révén változó színű vagy visszaverő képességű felületeken, vagy árnyékoló felületelemekről visszavert jelek esetén is jó érzékelési pontosságot adnak. Ezáltal kisebb lézerfolt méretet lehetett használni a vizsgálatokhoz.

Mikrométeres felbontású távérzékeléssel kapcsolatban további ismereteket lehet találni [48]–ban.



1. ábra Háromszögeléses távolságmérés sematikus vázlata, és a nyalábforma

2.3. Lézer Doppler vibrométer

A Lézer Doppler vibrométréről egy korábbi cikkben már szó volt [49]. Jelen fejezetben kiegészítve kerül bemutatásra.

A szilárd felületet vizsgáló lézeres Doppler-sebességmérőket gyakran Lézer Doppler Vibrométereknek vagy Lézer Doppler Interferométernek nevezik. Az interferométerből (LDV: Laser Doppler Vibrometer) kijövő lézersugarat a vizsgálni kívánt objektum felületének egy pontjára kell fókuszálni, s e felület rezgésének sebességi amplitúdójára és frekvenciájára következtetni lehet a visszavert lézerfény frekvenciája segítségével a Doppler-effektus alapján. A Doppler-effektus lényege, hogy ha a hullámfor-

rás és a megfigyelő egymáshoz képest mozog, akkor a megfigyelő a hullám frekvenciáját és hullámhosszát a kibocsátott hullámétól eltérőnek fogja érzékelni. Ez az effektus, mely felfedezőjéről a Doppler-effektus nevet kapta, igen sok műszaki alkalmazásnak (mint a sebességmérés) képezi alapját.

Az akusztikai Doppler effektusnál a közeghez képest a megfigyelő és a hullámforrás is mozoghat v_m , illetve v_f sebességgel. Mindkét mozgás arra vezet, hogy a megfigyelő az eredeti f_0 frekvenciától eltérő f frekvenciát érzékel. Ezeket közösen az

$$f = f_0 \frac{c \pm v_m}{c \mp v_f} \quad (1)$$

képletbe foglalhatjuk, ahol c a hullám fázissebessége az adott közegben, a felső előjelek a közeledésre az alsók pedig a távolodásra vonatkoznak.

Ha v sebességgel mozgó tárgyról visszaverődő hullámot detektálunk az álló hullámforrás mellett, akkor mindkét típusú mozgással számolni kell. Ugyanis a mozgó tárgy először detektálja a hullámot (mozgó megfigyelő), majd kibocsátja (mozgó forrás). A végeredmény közeledő visszaverő tárgy esetén:

$$f = f_0 \frac{c + v}{c - v} \quad (2)$$

(Távolodó visszaverő tárgy esetén az előjelek ellentétesek.) Megjegyezzük, hogy a vákuumban terjedő fényre az (1) képlet nem használható, a (2) képlet azonban igen.

A vibrométer általában egy két lézersugaras interferométer, ami méri a frekvencia (vagy fázis) különbséget egy belső referencia nyaláb és a mérősugár között. Az LDV-kben általában hélium-neon (He-Ne) gázlézer van. A mérősugár a céltárgyra irányul és az arról szóródott fényt összegyűjtjük és interferáltatjuk a referencia sugárral a fotodetektoron (ami jellemzően fotodióda). A kereskedelmi vibrométerek esetén tipikusan 20-40 MHz eltolás van a két lézersugár között, amit egy Bragg-cella, más néven akusztó-optikai modulátor generál. Ez a heterodin elvű mérés megvalósításához szükséges. A **2. ábra** a vibrométer vázlatos felépítését mutatja be. A lézerből érkező (f_0 frekvenciájú) lézersugarat az első nyalábosztó osztja szét az ún. referencia és mérősugárra. A mérősugár áthalad a Bragg-cellán, amely f_b frekvenciatolást ad hozzá, ez a lézersugár van a céltárgyra irányítva. A tárgy mozgása pedig hozzáad egy f_d Doppler-eltolást a sugárhoz:

$$f = f_0 \frac{c + v}{c - v} \cong f_0 \left(1 + 2\frac{v}{c}\right) = f_0 + f_d \quad (3)$$

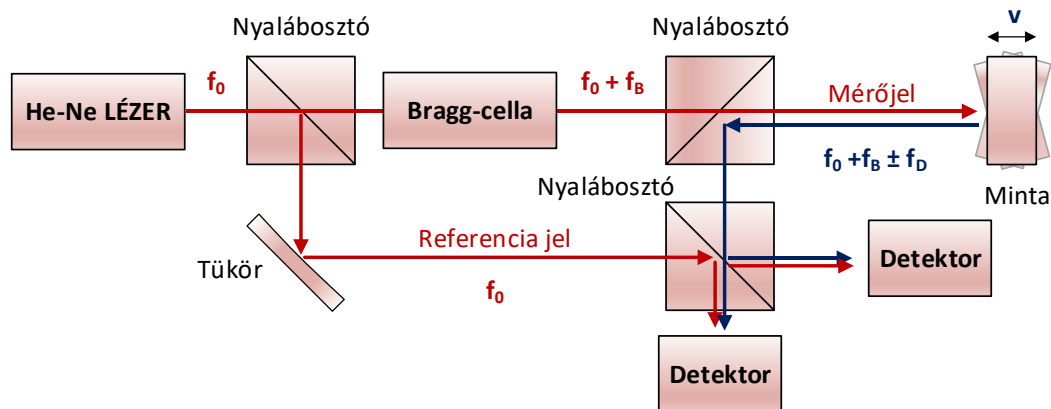
Tehát

$$f_d = 2f_0 \frac{v}{c} = 2\frac{v}{\lambda} \quad (4)$$

Mindez természetesen csak akkor igaz, ha nincs „koszinuszos” hiba, azaz ha a lézersugár és a sebességvektor párhuzamos. A fény a céltárgyról minden irányba visszaverődik, de a fény egy részét összegyűjti az LDV optikája és a nyalábosztón keresztül a fotodetektorra tükrözi. Pontosabban, az LDV két dolgot rögzít: a cél sebességét a lézersugárral azonos irányban, és a felület visszaverő képességét annak alapján, hogy mennyi lézerefény tükröződik vissza.

Mivel a szórt fény frekvenciája egyenlő $f_0 + f_b + f_d$ -vel és interferál a referencia nyalábbal, a találkozók két hullám frekvencia különbsége is megjelenik ($f_b + f_d$), mely érték a 10 MHz-es tartományba esik. A fotodetektor kimenete egy standard frekvencia-modulált (FM) jel lesz, a Bragg-cellával mint vivőfrekvenciával és a Doppler-eltolással, mint modulációs frekvenciával.

Az interferencia megfigyeléséhez a visszaverődést követően természetesen mindkét sugárnak azonos polarizációval kell rendelkeznie. Gyakorlatban 45 fok szokott lenni, melyet polarizátorok beépítésével érünk el. Az érzékelő által szolgáltatott áram a detektorra eső fény teljesítményével arányos, azonban a fotodiódák tulajdonságai miatt az eszköz a teljesítmény időátlagát méri néhány ciklus alapján. A kapott jelből demodulációval a céltárgy sebességének időfüggése meghatározható.



2. ábra. A vibrométer vázlatos felépítése [49]

Gyakorlatban jelfeldolgozás szempontjából jellemzően a heterodin kvadratura demodulációval találkozunk. A kvadraturás elrendezés segít meghatározni a mozgás irányát és csökkenteni a lézerforrásból származó teljesítményingadozások hatását, ezzel az érzékenység javulását idézi elő [50], [51]. Emellett az alacsony frekvenciájú zaj kiszűrhető, ami a homodin technikánál nehéz. Heterodin LDV-ben optikai frekvenciaváltót (Bragg-cella) annak biztosítására használnak, hogy a fotodetektor áramjelének vivőfrekvenciája ne legyen nulla. Vagyis elkerülhető legyen a fotodetektorokban és az azt követő elektronikában fellépő alacsony frekvenciájú zajnak néha a detektor telítettségéhez is vezető zavaró hatása. Félvezető lézereknél a 20 MHz-nél alacsonyabb frekvenciatartományban általában jelentős zaj van [29], ezért 20 MHz, vagy annál nagyobb frekvenciaeltolást alkalmaznak, de a zaj frekvencia tartománya az adott fotodetektor kialakítástól is függ.

Érdekes megjegyezni, hogy Hasheminejad kutatócsapatának közelmúltban megjelent munkájában egy hagyományos hélium-neon (He – Ne) alapú LDV-t és a közelmúltban kifejlesztett infravörös lézeres rezgésmérőt hasonlítottak össze [52]. Különböző felületi viszonyok közt vizsgálva a lézerjelet megállapították, hogy a He-Ne LDV zajszintje magasabb, ha sötétebb, vagy rosszabb reflektivitású felületről (pl. aszfaltbeton) verődik vissza. A jel minősége azonban korrigálható egyrészt a felület minőségének javításával, másrészt azzal, hogy ha a megvilágító fény frekvenciája nem a szokásos (He-Ne), hanem az infravörös tartományban helyezkedik el.

3. Összefoglalás

A lézeres mérések állapotfelügyeleti célú alkalmazáslehetőségeit vizsgálva alapvetően két lézermódszert találtam elterjedtnek. A két módszert azonban nem jelent konkurenciát egymásnak. Mindkettőnek megvannak az előnyei és a korlátai. Míg a trianguláris érzékelőkkel elmozdulást, vagy ezáltal közvetve felületi érdességet lehet mérni, a lézer doppleres érzékelők a rezgésmérésben képesek hatékonyan nagy felbontású mérőjelet produkálni. Mindkét alkalmazásra példát kapunk a következő részből.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az NKFI-125117 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K_17 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

- [1] “The machine tool industry: three trends affecting it globally.” [Online]. Available: <https://www.etmm-online.com/the-machine-tool-industry-three-trends-affecting-it-globally-a-721307/>. [Accessed: 03-Sep-2019].
- [2] M. Iliyas Ahmad, Y. Yusof, M. E. Daud, K. Latiff, A. Z. Abdul Kadir, and Y. Saif, “*Machine monitoring system: a decade in review*” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 108, no. 11–12. Springer, pp. 3645–3659, 01-Jun-2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05620-3>
- [3] H. Yi-Cheng, L. Chang-Chih, and C. Po-Chou, “*Prognostic diagnosis of the health status of an air-turbine dental handpiece rotor by using sound and vibration signals*” J. Vibroengineering, vol. 18, no. 3, pp. 1514–1524, 2016. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16735>
- [4] C. Nath, “*Integrated Tool Condition Monitoring Systems and Their Applications: A Comprehensive Review*” Procedia Manuf., vol. 48, pp. 852–863, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.123>
- [5] P. Kovač and I. Mankova, “*A review of machining monitoring systems*” J. Prod. Eng. vol. 11, no. 1, pp. 8–13, 2011.
- [6] R. Landers, Galip Ulsoy, and R. Furness, “*Process Monitoring and Control of Machining Operations*” Taylor & Francis Group, 2001. <https://doi.org/10.1201/9781420036749.ch6>
- [7] D. Djurdjanovic, L. Mears, F. A. Niaki, A. U. Haq, and L. Li, “*State of the Art Review on Process, System, and Operations Control in Modern Manufacturing*” Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, vol. 140, no. 6. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 01-Jun-2018. <https://doi.org/10.1115/1.4038074>
- [8] Z. Zhou, B. Yao, W. Xu, and L. Wang, “*Condition monitoring towards energy-efficient manufacturing: a review*” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 91, no. 9–12. Springer London, pp. 3395–3415, 01-Aug-2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0014-x>
- [9] D. Goyal and B. S. Pabla, “*Condition based maintenance of machine tools—A review*” CIRP J. Manuf. Sci. Technol., vol. 10, pp. 24–35, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.004>
- [10] R. M. Greenough and T. Grubic, “*Modelling condition-based maintenance to deliver a service to machine tool users*” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 52, no. 9–12, pp. 1117–1132, Feb. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2760-x>
- [11] M. N. H. Chikuruwo, L. Maregedze, and T. Garikayi, “*Design of an automated vibration monitoring system for condition based maintenance of a lathe machine (Case study)*” in 2016 International Conference on System Reliability and Science, ICSRS 2016 - Proceedings, 2017, pp. 60–63. <https://doi.org/10.1109/ICSRS.2016.7815838>
- [12] N. Tandon and A. Parey, “*Condition Monitoring of Rotary Machines*” 2006, pp. 109–136. https://doi.org/10.1007/1-84628-269-1_5

- [13] M. A. Elbestawi, M. Dumitrescu, and E.-G. Ng, "Tool Condition Monitoring in Machining" in *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*, Springer-Verlag, 2006, pp. 55–82. https://doi.org/10.1007/1-84628-269-1_3
- [14] A. G. Ulsoy, "Monitoring and Control of Machining" 2006, pp. 1–32. https://doi.org/10.1007/1-84628-269-1_1
- [15] J. A. Ghani, M. Rizal, M. Z. Nuawi, M. J. Ghazali, and C. H. C. Haron, "Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-friendly GUP" *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2619–2624, Jul. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.038>
- [16] T. Požar and J. Možina, "Enhanced ellipse fitting in a two-detector homodyne quadrature laser interferometer" *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 8, 2011. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/8/085301>
- [17] Cho, S., Binsaeid, S. & Asfour, S. "Design of multisensor fusion-based tool condition monitoring system in end milling" *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* vol. 46, pp. 681–694 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2110-z>
- [18] V. Ostasevicius et al., "Monitoring the condition of the cutting tool using self-powering wireless sensor technologies" *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9–12, pp. 2803–2817, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8939-z>
- [19] P. Wright, D. Dornfeld, and N. Ota, "Condition monitoring in end-milling using wireless sensor networks (WSNs)" in *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 2008, vol. 36, pp. 177–183.
- [20] M. Kunto Glu et al., "Optimization and Analysis of Surface Roughness, Flank Wear and 5 Different Sensorial Data via Tool Condition Monitoring System in Turning of AISI 5140."
- [21] D. E. Dimla Snr., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods" *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1073–1098, Jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00122-4)
- [22] R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction" *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 55, no. 12, p. 1593, 1965. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001593>
- [23] M. Sadílek, J. Kratochvíl, J. Petru, R. Čep, T. Zlámal, and D. Stančėková, "Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers" *Teh. Vjesn.*, vol. 21, no. 3, pp. 639–644, 2014.
- [24] S. Donati and M. Norgia, "Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering" *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 05, p. 1, Mar. 2018. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.5.051506>
- [25] S. Kurada and C. Bradley, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring" *Computers in Industry*, vol. 34, no. 1. Elsevier, pp. 55–72, 01-Oct-1997. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(96\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(96)00075-9)
- [26] R. B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470977668>
- [27] J. Downey, S. Bombiński, M. Nejman, and K. Jemielniak, "Automatic multiple sensor data acquisition system in a real-time production environment" in *Procedia CIRP*, 2015, vol. 33, pp. 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.039>
- [28] Y. Li, J. Zhu, M. Duperron, PO'Brien, R. Schüler, S. Aasmul, M. de Melis, M. Kersemans, R. Baets. "Six-beam homodyne laser Doppler vibrometry based on silicon photonics technology" *Opt. Express*, vol. 26, no. 3, p. 3638, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.003638>

- [29] Y. Li: "Miniaturized Laser Doppler Vibrometer Integrated on a Silicon Photonics Platform" 2012. PhD thesis, Universiteit Gent
- [30] M. Rizal, J. A. Ghani, & Mohd, Z. Nuawi, C. Hassan, and C. Haron, "An embedded multi-sensor system on the rotating dynamometer for real-time condition monitoring in milling." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* vol 95, pp. 811–823 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1251-8>
- [31] C.-F. Bisu, P. Darnis, A. Gérard, and J.-Y. K'Nevez, "Displacements analysis of self-excited vibrations in turning" *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* vol. 44, 1–16 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1815-8>
- [32] K. Tatar and P. Gren, "Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry" *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 3–4, pp. 380–387, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.09.009>
- [33] M. Béres and B. Paripás, "Measuring of drill bit vibration by laser Doppler methods" in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 448, no. 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012068>
- [34] B. S. Prasad, M. M. M. Sarcar, and B. S. Ben, "Development of a system for monitoring tool condition using acousto-optic emission signal in face turning-an experimental approach" *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 1–4, pp. 57–67, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2607-5>
- [35] B. S. Prasad, K. A. Prabha, and P. V. S. G. Kumar, "Condition monitoring of turning process using infrared thermography technique – An experimental approach" *Infrared Phys. Technol.*, vol. 81, pp. 137–147, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.023>
- [36] K. V. Rao, B. S. N. Murthy, and N. M. Rao, "Experimental study on tool condition monitoring in boring of AISI 316 stainless steel" *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 230, no. 6, pp. 1144–1155, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1177/0954405414565139>
- [37] K. Tatar, M. Rantatalo, and P. Gren, "Laser vibrometry measurements of an optically smooth rotating spindle" *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 4, pp. 1739–1745, May 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.08.006>
- [38] J. R. Bell and S. J. Rothberg, "Laser vibrometers and contacting transducers, target rotation and six degree-of-freedom vibration: What do we really measure?" *J. Sound Vib.*, vol. 237, no. 2, pp. 245–261, Oct. 2000. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3053>
- [39] L. Dan and J. Mathew, "Tool wear and failure monitoring techniques for turning-A review" *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 30, no. 4, pp. 579–598, Jan. 1990. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90009-8)
- [40] F. J. Shiou and M. J. Chen, "Intermittent process hybrid measurement system on the machining centre" *Int. J. Prod. Res.*, vol. 41, no. 18, pp. 4403–4427, Dec. 2003. <https://doi.org/10.1080/00207540310001595783>
- [41] A. K. Kiss, D. Bachrathy, and G. Stepan, "Laser scanned patterns of machined surfaces" in *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 355–358. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.034>
- [42] H. Zhang, Y. Ren, C. Liu, and J. Zhu, "Flying spot laser triangulation scanner using lateral synchronization for surface profile precision measurement" *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 20, p. 4405, Jul. 2014. <https://doi.org/10.1364/AO.53.004405>
- [43] C. C. Wu, W. J. Wu, Z. S. Pan, and C. K. Lee, "Laser linear encoder with both high fabrication and head-to-scale tolerances" *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 16, pp. 3169–3176, Jun. 2007. <https://doi.org/10.1364/AO.46.003169>

- [44] Z. Dong, X. Sun, C. Chen, and M. Sun, "A fast and on-machine measuring system using the laser displacement sensor for the contour parameters of the drill pipe thread" *Sensors* (Switzerland), vol. 18, no. 4, Apr. 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041192>
- [45] P. Petrović, "Rubberized cord thickness measurement based on laser triangulation, Part I: Technology" *FME Trans.*, vol. 35, no. 2, pp. 77–84, 2007.
- [46] K. Žbontar, M. Mihelj, B. Podobnik, F. Povše, and M. Munih, "Dynamic symmetrical pattern projection based laser triangulation sensor for precise surface position measurement of various material types" *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 12, pp. 2750–2760, Apr. 2013. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002750>
- [47] J. C. Dainty, "The statistics of speckle patterns" *Prog. Opt.*, vol. 14, no. C, pp. 1–46, Jan. 1977. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70249-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70249-X)
- [48] M. Béres and B. Paripás, "Optikaimódszerek mikrométeres felbontású távolságmérésre" MultiScience - XXXII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, 5-6 September, 2018. <https://doi.org/10.26649/musci.2018.022>
- [49] M. Béres and B. Paripás, "Fúrósár rezgéseinek mérése lézer doppler módszerrel" MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, Hungary, 20-21 April 2017. 2018. <https://doi.org/10.26649/musci.2017.053>
- [50] J. Cui, Z. He, Y. Jiu, J. Tan, and T. Sun, "Homodyne laser interferometer involving minimal quadrature phase error to obtain subnanometer nonlinearity" *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 25, p. 7086, Sep. 2016. <https://doi.org/10.1364/AO.55.007086>
- [51] Y. Li and R. Baets, "Homodyne laser Doppler vibrometer on silicon-on-insulator with integrated 90 degree optical hybrids" *Opt. Express*, vol. 21, no. 11, p. 13342, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1364/OE.21.013342>
- [52] N. Hasheminejad, C. Vuye, W. van Den Bergh, J. Dirckx, and S. Vanlanduit, "A comparative study of laser Doppler vibrometers for vibration measurements on pavement materials" *Infrastructures*, vol. 3, no. 4, Nov. 2018. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040047>