

Doktori (PhD) értekezés
Soproni Egyetem
Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskola
Vezető: Prof. Dr. Bejó László egyetemi tanár

**IPARI RENDSZEREK KORSZERŰ IT
ALAPÚ INTEGRÁCIÓJA**

Című PhD értekezés tézislevele

Készítette: Ledenyák Dániel
Témavezető: Dr. Rosta Tamás, Dr. Andó Máttyás

Sopron
2025

1. A kutatási téma időszerűsége, célkitűzések

A fejlett államokban a harmadik ipari forradalom lényegében zökkenőmentesen lezajlott, mivel az új technológiák, módszertanok jól integrálhatóak voltak a meglévő folyamatokba. Az új megoldások alkalmazásával járó előnyök kézzel fogható és markáns fejlődési lehetőséget teremtettek. Az idő előrehaladtával és a számítástechnika folyamatos fejlődésével új távlatok nyíltak meg az adatok feldolgozását tekintve. Az így elérhető előny, bár számos szakirodalomba publikálásra kerültek, mégis sokkal nehezebben értelmezhetőek, integrálhatóak. Különösen igaz - ez a gazdaság egyik fontos pillérét adó - kis és középvállalatok esetén. A doktori értekezésem a dolgozat alapvető nyilvános mivolta miatt az ilyen vállalatok számára enged betekintést az I4.0 kifejezés megfelelő értelmezéséhez, adott feltételrendszer szerinti kialakításához. A dolgozatban bemutatott folyamatok alkalmasak a mérőeszközök segítségével kapott, elemzett adatok IT integrálhatóságának lehetőségeinek megértéséhez. Ezen kutatási területek, témakörök tökéletesen illeszkednek az általános gépészeti és faipari mérnöki tudományokhoz. A dolgozat a mérési

folyamatok-, megoldások-, szerszámgépek-, mérési pontosságához, felügyeletéhez szükséges megelőző karbantartások tervezésére; illetve hosszútávú fenntartható működésükre fókuszál.

A bemutatott, és az ezekhez jól illeszkedő vizsgálatok, adatgyűjtések, majd azok megfelelő módszerrel történő feldolgozása középtávon folyamatbiztonságot, míg hosszabb távon matematikai alapon történő döntéshozatali támogatás felhasználásával a folyamatok fejlesztését jelentik. Személyes véleményem és motivációm, hogy ne menjünk el az I4.0 kifejezés mellett, mint egy elhasznált marketing szlogen vagy kampánymondat mellett, hanem igenis használjuk az általa adott lehetőségeket! Fontos kiemelni, hogy nem egy átláthatatlan bonyolult rendszerként kell rá tekinteni, hanem egy műszaki megoldásokra és tapasztalatokra épülő szabványos fejlesztési lehetőségként; amelynek elődje, a számítógéppel támogatott gyártás az elmúlt 40-50 évben már bizonyított.

Dolgozatom elkészítésénél elsődleges célként tűztem ki, hogy közérthetővé tegyem a I4.0 alapfogalmait, segítsem az új mérési és kiértékelési eljárások megértését a kis- és közepes vállalatok helyzetére fókuszálva, használatát és hasznosítását.

A dolgozatom bevezetésként felkelti az olvasó figyelmét a téma aktualitására és fontosságára - A különböző érettségi szintek és megoldási lehetőségek bemutatásával. Kutatásom kezdetben a különböző munkadarabok satupofák által okozott deformációinak háttérkörnyezetének mérésével és modellezésével kinyert adatok elemzéséhez kapcsolódik. A mérések során a vizsgálat fókuszába került a munkadarab és satupofák kölcsönhatásaként jelentkező kölcsönös deformáció.

Folytatásként a modern megmunkálóközpontok, univerzális felhasználhatóságuk és elterjedtségük miatt kerültek a fókuszba. A vizsgálat a CNC vezérelt megmunkáló központokba integrált, vezetékek nélküli, optikai adatátviteli elven működő tapintó mérőrendszerek pontosságának ellenőrzésére és használatuk háatarainak kitolására irányul.

A modern gyártókörnyezetet vizsgálva nem lehet figyelmen kívül hagyni a 3D scannelést és nyomtatást. A kutatás következő felvonása így a 3D nyomtatott munkadarabok geometriai mérésére fókuszál. A használt 3D scanner adatainak kiértékelésére klaszteranalízis, míg ellenmérésére hagyományos mérőeszközök szolgáltak. Az összehasonlítás izgalmas és hasznos képet ad a fejlett technológiák és a hagyományos eljárások közötti átjárhatóság megértésére.

Az adatok kiértékeléséhez - a számítástechnika fejlődésének köszönhetően - kiterjedt eszköztár áll rendelkezésre. A dolgozat ezen szakaszában a különböző mérőeszközök és eljárások teljesítményének, illetve pontosságának összehasonlítására, valamint az adatfúzió alkalmazásának lehetőségének vizsgálatára került sor. A szerszámkopás modellezésére az adatfúzió kiváló alapot biztosít, amely eljárás az adatcsomag folyamatos fejlődése és növekedése miatt egyre pontosabb képet ad.

Manapság a szerszámgépek pontosságának és állapotának vizsgálatára többféle lehetőség is van. Dolgozatomban a Ballbar mérés alkalmazásának fejlesztésére fókuszáltam, hiszen ez egy nagyon pontos, és

mégis könnyen és univerzálisan alkalmazható eljárás. A kinyert adatok lehetőséget adnak a szerszámgép hibáinak megértésére, viszont az adatsomagok modern statisztikai eljárások segítségével kiértékelve összetettebb képet adnak mind a gép jelenlegi, mind pedig időben változó állapotáról.

Az adathalmazok valós idejű monitorozása és optimalizálása hozzájárul a termelési hatékonyság növeléséhez és a hibák csökkentéséhez.

2. A vizsgálatban használt eszközök

2.1. Használt eszközök

Megmunkálógép: AKIRA SEIKI Performa V2.5

pozícionálási pontosság: ± 0.01 mm

ismétlési pontosság: ± 0.003 mm

Mérőfej: Renishaw OPM40-2

irányfüggetlen pontosság: 0.001 mm

Koordináta mérőgép: COORD3 Universal 10/7/7

Mérőfej: Renishaw PH20SP25M cal. ISO 10360-2

Satu: Gerardi StandardFLEX satu D24 mm

Nyomatékkulcs 40-250 Nm ISO: DIN EN ISO 6789-1:2017

3D nyomtató Prusa MK4S

3D scanner: HP 3D Structured Light Scanner Pro S3

Hőmérő szenzor: PC21MT-0 Calex

Pontosság $\pm 1\%$ leolvasási vagy $\pm 1^\circ\text{C}$

Ismételhetőség $\pm 0.5\%$ of leolvasási vagy $\pm 0.5^\circ\text{C}$

Körteszt: Renishaw Ballbar QC 20

2.2. Alkalmazott módszerek rövid bemutatása:

Feszültség alakváltozás modell:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix},$$

Átlagos négyzetes hiba gyökének számítása

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

ahol:

y_i : a valódi érték (az igaz adat),

$\hat{y}_i$: a becslült vagy előre jelzett érték (a modell által adott érték),

n : az adatpontok (minták) száma.

Fisher féle F próba: Ekkor a próbastatisztikának használandó a következő empirikus érték:

$$F_{emp} = \frac{S_X^2}{S_Y^2}$$

T próba:

$$= \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{(n-1)S_X^{*2} + (m-1)S_Y^{*2}}} \cdot \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}$$

Ahol a tagok a következőket jelentik:

$\bar{x}$ az egyik valószínűségi változó átlaga a mintában

$\bar{y}$ a másik valószínűségi változó átlaga a mintában

S_X^{*2} az egyik valószínűségi változó korrigált szórása

S_Y^{*2} a másik valószínűségi változó korrigált szórása

n és m pedig egyik és másik minta elemszáma.

K közép klaszteranalízis

3. Új tudományos eredmények összefoglalása

3.1. Gépsatuban létrejövő deformáció vizsgálata

Dolgozatom első lépéseként a megmunkálást megelőző fontos, de leggyakrabban sajnos kevésbé ellenőrzött lépést vizsgáltam. A munkadarab és a satu között különböző geometriák és meghúzási nyomatékok esetén vizsgáltam a közöttük létrejövő kölcsönös deformációt.

Tézis 1. Kutatásaim során végzett mérések és szimulációk alapján megállapítottam, hogy a munkadarab gépsatuba történő befogása során nem elegendő csupán a munkadarab deformációját figyelembe venni; a satupofák rugalmas alakváltozása és helyzetváltozása szintén számottevő hatással van a rögzítés minőségére. Egyszerű, hasáb alakú, különböző hosszúságú munkadarabok esetében a bekövetkező deformációk végelelemes módszerrel pontosan és realiztikusan modellezhetők. A szimulációs eredmények és a mérési adatok egybevetése lehetővé teszi egy olyan alkalmazható tudásbázis kialakítását, amely az egyes geometriai és anyagjellemzők, valamint a technológiai paraméterek

(például forgácsolási erők) alapján meghatározza az optimális, biztonságos megfogást biztosító gépsatu-meghúzási nyomatékértékeket.

3.2. CNC megmunkológép mérési képességének vizsgálata

Az Akira Seiki megmunkáló gépbe integrált Renishaw optikai adatátviteli elven működő mérő tapintó által szolgáltatott értékek felhasználhatóak az adott folyamat tekintetében egyszeri alkalommal, azonban az I4.0 koncepciónak megfelelően az adatokat elemezve összetett képet kapunk eszközünkről. Megfelelő kalibrációt és ellenőrzést követően a gyártói pontosság lényegesen meghaladható.

Tézis 2. A kísérletek során bizonyítást nyert, hogy a CNC megmunkáló gépbe integrált vezeték nélküli optikai adatátviteli elven működő tapintó mérőrendszerrel végzett geometriai mérések pontossága megfelelő kalibrációt követően egyenértékű a koordináta mérőgép pontosságával. Sajnos a vállalatok felépítése miatt ez az adatkiértékelés gyakran nem történik meg. Az integrált vezeték nélküli optikai adatátviteli elven működő tapintó

mérőrendszer a megmunkológép adott pillanatban elérhető helyzetadatait rögzíti, így a pozicionálási hibával terheli a méréseket. A megfelelő periodikussággal végzett koordináta mérőgépen történt külső mérések és a megmunkológépben mért adatok összevetésével következtetni lehet a megmunkológép pontosságvesztésére, meghibásodására.

3.3. 3D technológiákat támogató mérések kiértékelése

Manapság a 3D technológiákkal kapcsolatos eljárások megkerülhetetlen összetevői lettek a műszaki életnek. A gyors prototípus gyártás és a szinte teljes geometriai függetlenség óriási hatással van a terméktervezés és a gyártási folyamatra egyaránt. A dolgozatomban a modern 3D scanner és a hagyományos mérési technológiák alkalmazhatóságát és pontosságát vizsgáltam 3D nyomtatott munkadarab esetén.

Tézis 3. Koordináta mérőgéppel történt ellenőrző mérések alkalmazásával megállapítottam, hogy 3D nyomtatott alkatrész 3D felületmérési környezetből származó eredmények alapján az eljárás teljesíti az MSZ ISO 2768-1:1991 szabvány c pontossági osztályát, így az alkalmas

az alkatrészek automatizált ellenőrzésére. A felületi mérések által rendelkezésre álló pontfelhők jól kezelhető adatsomagok, amelyek a gép állapotának vizsgálatára és a későbbi gyártás pontosságának növelésére is alkalmazhatóak. A gyakorlati alkalmazhatóság érdekében tolómérővel és mikrométerrel is végeztem méréseket. Statisztikai alapú próbák segítségével megállapítottam, hogy a tolómérő is megfelelő alternatíva a 3D nyomtatott alkatrész ezen pontossági osztályához, viszont a két mérőeszköz alkalmazása egymást nem helyettesítheti, csak kiegészíti.

3.4. Machine learning folyamatokat támogató mérések kiértékelése

Kutatómunkám talán legizgalmasabb részlete az adatfúzió megvalósítási lehetőségének vizsgálata. Mérettől és széria nagyságtól függetlenül az egyik leggyakoribb nem várt gépállási ok a szerszámtörés. Sajnos extrém esetben nem csak a szerszám vagy munkadarab sérül, hanem sajnos a megmunkálógép is sérülhet. Kutatásomban geometriai méréseket, független hőmérsékleti méréseket és a várható szerszámkopás alapján becsült értékeket használtam. Az

adatsomag kiértékelésénél gépi tanulás módszer alkalmas a jövőbeli adatok becslésére. Minél nagyobb az adatsomag, és minél többször korrigált, a becslés annál pontosabban végezhető.

Tézis 4. CNC megmunkálógép főorsójába rögzített mérőtapintó és infravörös mérési elven működő hőmérséklet érzékelő szenzorral történő mérések eredményei - megfelelő statisztikai feldolgozást követően - alkalmasak arra, hogy előre jelezzék a szerszámkopás miatti geometriai eltéréseket. A kapott értékek felhasználásával így minimalizálni lehet a szükséges munkadarabon történő szerszámkorrekciós mérések számát.

3.5. A ballbar mérések bemutatása

A ballbar a Renishaw által fejlesztett mérőeszköz, amely a megmunkálógép kör irányú elmozdulásából nyer adatokat. A kapott értékekből következtethetünk a megmunkálógép állapotára, hibáinak okaira. A kutatómunkában az így nyert adatok felhasználhatóságát fejlesztettem.

Tézis 5. A ballbar méréssel kapott adatok az általam fejlesztett elemzési módszerekkel alkalmasak hosszú távú trendek vizsgálatára, illetve poláris koordináta rendszerből a descartes rendszerbe transzformálva korrekciós adatként való felhasználásra. Az így kapott adatok alapján hosszú távon figyelhető a szerszámgép kopása, vagy a hibás telepítés vagy gyártási probléma miatti eltérések változása.

4. Dolgozat témájához kapcsolódó publikációk:

1. Ledenyák, Daniel; Rosta, Tamás ; Andó, Mátyás
Improve the Practical Usability of Ballbar Machine Tool Verification In: Csüllög, Mihály; Mankovits, Tamás (szerk.) 10th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering : Selected peer-reviewed full text papers from the 10th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2024) Bäch, Svájc : Trans Tech Publications (2025) pp. 189-198. , 10 p.DOI Scopus Egyéb URL Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos [36230906]

2. Ledenyák, D. ; Rosta, T. ; Hargitai, H. Novel Technique for Reducing Geometrical Inaccuracies of Clamped Workpiece During Machining: A Hybrid Method In: Khotsianovsky, Alexander; Chen, Yuan (szerk.) Material Strength and Applied Mechanics : Proceedings of the 7th International Conference (MSAM 2024) Amsterdam, Hollandia : IOS Press (2024) 554 p. pp. 269-276. , 8 p. DOI SOE Publicatio repozitórium Scopus Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos [35677826] [Egyeztetett]

3. Ledenyák, Dániel ; Rosta, Tamás
Investigation The Milling Accuracy With I4.0
Compatible Processes And Method In: Dániel, Molnár; Dóra,
Molnár (szerk.) XXVI. Tavasz Szél Konferencia 2023 :
Tanulmánykötet I. Budapest, Magyarország : Doktoranduszok
Országos Szövetsége (DOSZ) (2023) 572 p. pp. 488-493. , 6 p.
Teljes dokumentum Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) |
Tudományos[36268612] [Nyilvános]

4. Birosz, Márton Tamás ; Ledenyák, Dániel ;
Andó, Mátvás Effect of FDM infill patterns on mechanical
properties POLYMER TESTING 113 Paper: 107654 (2022)
DOI WoS EDIT Szakcikk (Folyóiratcikk) | Tudományos
[32869201] [Admin láttamozott] Nyilvános idéző összesen: 78,
Független: 76, Függő: 2, Nem jelölt: 0

5. Ledenyak, Daniel ; Rosta, Tamás Modern
Measurement Methods Introduced in I4.0 Manufacturing
Systems MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK
(EN) 17 : 1 pp. 42-45. , 4 p. (2022) DOI Szakcikk
(Folyóiratcikk) | Tudományos [33573978] [Admin láttamozott]

6. Ledenyak, Daniel ; Rosta, Tamás Az I4.0
gyártási rendszerekben alkalmazott modern mérési módszerek
Műszaki Tudományos Közlemények (Hu) 17 : 17 pp. 42-45. , 4
p. (2022) DOI EDIT Utánközlés (Folyóiratcikk) | Tudományos
[33590919] [Admin láttamozott]

7. Ledenyák, Dániel
Investigate And Improve The Accuracy Of 3d Printing
In I4.0 Environment In: Molnár, Dániel; Molnár, Dóra; Nagy,
Adrián Szilárd (szerk.) Tavasz Szél 2022 / Spring Wind 2022
Tanulmánykötet II. Budapest, Magyarország : Doktoranduszok
Országos Szövetsége (DOSZ) (2022) 584 p. pp. 351-358. , 8 p.

Teljes dokumentum Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos[36268636] [Nyilvános]

8. Kovács, Zsolt ; Ledenyák, Dániel CBN esztergaszerszámok összehasonlító vizsgálata In: Johanyák, Zsolt Csaba; Kovács, Lóránt; Pásztor, Attila; Ferenczy, Tibor; Weltsch, Zoltán; Tóth, Ákos; Dobjánné, Antal Elvira (szerk.) Kutatás és innováció 2021 : GAMF Közlemények tanulmánykötete Kecskemét, Magyarország : Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar (2021) 477 p. pp. 13-21. , 9 p. Szaktanulmány (Könyvrészlet) | Tudományos [32600185] [Nyilvános]

9. Ledenyák, Dániel ; Kovács, Zsolt ; Rosta, Tamás Modern gyártókörnyezet adatkezelési koncepciója In: Johanyák, Zsolt Csaba; Kovács, Lóránt; Pásztor, Attila; Ferenczy, Tibor; Weltsch, Zoltán; Tóth, Ákos; Dobjánné, Antal Elvira (szerk.) Kutatás és innováció 2021 : GAMF Közlemények tanulmánykötete Kecskemét, Magyarország : Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar (2021) 477 p. pp. 72-80. , 9 p. Szaktanulmány (Könyvrészlet) | Tudományos [32600389] [Nyilvános]

10. Ledenyák, Dániel ; Kovács, Zsolt ; Rosta, Tamás Hagyományos és modern mérőeszközök összehasonlítása pontosság és alkalmazhatóság szerint In: Johanyák, Zsolt Csaba; Kovács, Lóránt; Pásztor, Attila; Ferenczy, Tibor; Weltsch, Zoltán; Tóth, Ákos; Dobjánné, Antal Elvira (szerk.) Kutatás és innováció 2021 : GAMF Közlemények tanulmánykötete Kecskemét, Magyarország : Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar (2021) 477 p. pp. 64-71. , 8 p. Szaktanulmány (Könyvrészlet) | Tudományos [32657277] [Nyilvános]