

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

LEDENYÁK DÁNIEL

Soproni Egyetem
Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Sopron

2025

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Bejó László egyetemi tanár

Doktori program: Fafeldolgozási technológiák és kreatív tervezés

Programvezető: Prof. Dr. Kovács Zsolt és Zalavári József DLA

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

IPARI RENDSZEREK KORSZERŰ IT ALAPÚ INTEGRÁCIÓJA

Készítette: Ledenyák Dániel

Témavezető: Dr. Rosta Tamás, Dr. Andó Mátyás

Sopron

2025

IPARI RENDSZEREK KORSZERŰ IT ALAPÚ INTEGRÁCIÓJA

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskolája

Írta:
Ledenyák Dániel

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola F2 Fafeldolgozási
technológiák és kreatív tervezés programja keretében

Témavezető: Dr. Rosta Tamás
Elfogadásra javaslom (igen / nem) (aláírás)

Témavezető: Dr. habil Andó Mátyás
Elfogadásra javaslom (igen / nem) (aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton/komplex vizsgán % -ot ért el,

Sopron, 2022, február 10.

.....
a Szigorlati/Komplex vizsga Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr.) igen /nem (aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen /nem (aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen /nem (aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron,

.....
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott Ledenyák Dániel jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a(z) Ipari rendszerek korszerű IT alapú integrációja című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.¹

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezető(i)met, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 2025 július 11.

.....
doktorandusz

1. ¹ **1999. évi LXXVI. tv.** 34. § (1) A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Tartalom

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK	7
A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK	7
1. BEVEZETÉS	8
1.1. KUTATÁSI TERÜLET BEMUTATÁSA, CÉLKITŰZÉS	8
1.2. ALAPVETŐ PROBLÉMÁK FELTÁRÁSA, ELEMZÉSE	9
1.3. A DOKTORI DISSZERTÁCIÓ FELÉPÍTÉSE	11
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	12
2.1. IPARI FORRADALMAK RÖVID ÁTTEKINTÉSE	12
2.2. SZÁMÍTÓGÉPES RENDSZEREK A GYÁRTÁSBAN – TÖRTÉNELMI ÁTTEKINTÉS	15
2.3. IPAR 4.0 KONCEPCIÓ FELÉPÍTÉSE	16
2.3.1. <i>Vertikális integráció.....</i>	<i>20</i>
2.3.2. <i>Horizontális integráció</i>	<i>20</i>
2.3.3. <i>Átfogó eszközhatékonyság.....</i>	<i>21</i>
2.3.4. <i>Környezetvédelem</i>	<i>22</i>
2.3.5. <i>KKV-k, Ipar 4.0 érettségi szintek, hatások.....</i>	<i>23</i>
2.3.6. <i>A KKV-k és a negyedik ipari forradalom</i>	<i>25</i>
2.3.7. <i>I 4.0 előnyei a kis és közepes vállalkozások számára:</i>	<i>26</i>
2.4. MINŐSGEMENEDZSMENT A NEGYEDIK IPARI FORRADALOMBAN	30
2.4.1. <i>Hibakompensáció.....</i>	<i>31</i>
2.4.2. <i>Adatgyűjtés.....</i>	<i>33</i>
2.5. MACHINE LEARNING A GYÁRTÁSBAN	35
2.5.1. <i>Machine Learning kategóriák.....</i>	<i>36</i>
2.5.2. <i>Felhőszolgáltatás (Cloud Services).....</i>	<i>37</i>
2.6. IPAR 4.0 TELJESKÖRŰ ELMÉLETI MEGVALÓSÍTÁSA	38
2.6.1. <i>Ipar 4.0 megoldások a gyakorlatban / Smart manufacturing.....</i>	<i>38</i>
2.6.2. <i>Cloud rendszerek és CNC programozás kapcsolata</i>	<i>39</i>
3. MÓDSZERTAN	42
3.1. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK BEMUTATÁSA	42
3.2. KORSZERŰ MATEMATIKAI METÓDUSOK	42
3.2.1. <i>Feszültség alakváltozás modell</i>	<i>44</i>
3.2.2. <i>Folyamatképesség meghatározása.....</i>	<i>46</i>
3.2.3. <i>Átlagos négyzetes hiba gyökének számítása.....</i>	<i>47</i>
3.3. ALKALMAZOTT STATISZTIKAI MÓDSZEREK	48
3.3.1. <i>Fischer-féle f próba.....</i>	<i>48</i>

3.3.2.	<i>T próba</i>	49
3.4.	MÉRŐESZKÖZ ÉS ELJÁRÁSOK BEMUTATÁSA	51
3.4.1.	<i>Koordináta méréstechnika</i>	51
3.4.2.	<i>COORD3 Koordináta mérőgép</i>	54
3.4.3.	<i>Mechanikus mérőfejek működése</i>	56
3.4.4.	<i>Szkennelő mérőfejek működése</i>	57
3.5.	CNC MEGMUNKÁLÓ KÖZPONT	59
3.6.	3D TECHNOLÓGIÁKAT TÁMOGATÓ MÉRÉSEK INTEGRÁLHATÓSÁGÁNAK ÁTTEKINTÉSE	61
3.6.1.	<i>Bevezetés, kutatási folyamat bemutatása</i>	61
3.6.2.	<i>Az algoritmus bemutatása</i>	64
3.7.	MACHINE LEARNING ESZKÖZ ALKALMASSÁGÁNAK HASZNÁLATA	67
3.7.1.	<i>Célkitűzés</i>	67
3.7.2.	<i>A gyártási, mérési környezet bemutatása</i>	67
3.8.	SZERSZÁMGÉP BALLBAR MÉRÉSEINEK KITERJESZTETT FELDOLGOZÁSA	69
3.8.1.	<i>Ballbar mérés alkalmazásának bemutatása</i>	69
3.8.2.	<i>A Ballbar mérés végrehajtása</i>	70
3.8.3.	<i>A mérés kiértékelésének fejlesztése</i>	72
4.	EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA, ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK	74
4.1.	GÉPSATUBAN LÉTREJÖVŐ DEFORMÁCIÓ VIZSGÁLATA	74
4.1.1.	<i>Bevezetés és célkitűzés</i>	74
4.1.2.	<i>Az analitikai paraméterek kiszámítása</i>	75
4.1.3.	<i>Szimulációval történő megoldás</i>	76
4.1.4.	<i>CMM mérések</i>	77
4.1.5.	<i>Eredmények összesítése</i>	79
4.1.6.	<i>Összefoglalás</i>	81
4.2.	CNC MEGMUNKÁLÓGÉP MÉRÉSI KÉPESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA.....	83
4.2.1.	<i>Vizsgálati eszközök, módszerek, eredmények</i>	83
4.2.2.	<i>Összegzés, a kutatás célja és hasznosítási területe</i>	91
4.3.	3D TECHNOLÓGIÁKAT TÁMOGATÓ MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE.....	92
4.3.1.	<i>A vizsgált próbatest</i>	92
4.3.2.	<i>A kapott eredmények kiértékelése</i>	92
4.4.	MACHINE LEARNING FOLYAMATOKAT TÁMOGATÓ MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE	98
4.4.1.	<i>Az RNN módszer rövid áttekintése</i>	98
4.4.2.	<i>Eredmények és tapasztalatok összefoglalása</i>	101
4.5.	A BALLBAR MÉRÉSEK BEMUTATÁSA.....	102
4.5.1.	<i>A program használata</i>	102
4.5.2.	<i>Kiértékelés a szoftver segítségével, használatának előnyei</i>	103
4.6.	A DOLGOZATBAN BEMUTATOTT FOLYAMATOK GYAKORLATI ALKALMAZHATÓSÁGA	109
4.6.1.	<i>Gépsatuban létrejövő deformáció vizsgálatának gyakorlati hasznossága</i>	111

4.6.2.	<i>CNC megmunkálógép mérési képességének alkalmazása.....</i>	<i>112</i>
4.6.3.	<i>3D méréstechnika integrálhatóságának bemutatása</i>	<i>112</i>
4.6.4.	<i>Machine learning folyamatok alkalmazása.....</i>	<i>113</i>
4.6.5.	<i>A ballbar mérések bemutatása.....</i>	<i>114</i>
4.7.	TÉZISPONTOK	115
5.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	118
6.	ÖSSZEFOGLALÁS (SUMMARY IN ENGLISH).....	125
7.	IRODALOMJEGYZÉK.....	127
8.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	140
	MELLÉKLETEK:.....	141

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK

T	[°C]	hőmérséklet
σ_T	[MPa]	húzószilárdság
F_M	[N]	maximális erő
p'	[°]	súrlódási szög
β	[°]	menetszög
p	[mm]	menetemelkedés
d_a	[mm]	névleges átmérő
μ'		súrlódási együttható
F_0	[N]	kifejtett erő (meghúzáskor)
T	[Nmm]	teljes nyomaték
T_m	[Nmm]	Maximális nyomaték (erőből)
T_a	[Nmm]	súrlódási erők miatti nyomaték
A_0	[mm ²]	kezdeti keresztmetszet
E	[MPa]	Young modulusz
σ_{bh}	[MPa]	hajlítószilárdság
ε_T	[%]	maximális erőnél mért nyúlás
E_{bh}	[MPa]	hajlító rugalmassági modulusz

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK

I 4.0	4. Ipari forradalom
LEAN	Vállalatszervezési, vállalatirányítási módszer
CPS	kiber-fizikai rendszer
OEE	Overall Equipment Effectiveness adott folyamat hatékonysága
PLC	Programozható logikai vezérlő
MES	Manufacturing Execution System szoftverekből és érzékelőkből álló integrált rendszer, amely valós idejű adatokat szolgáltat az üzemi tevékenységekről.
ERP	Enterprise Resource Planning, vállalati erőforrástervezés rendszere
SPC	Statisztikai folyamat szabályzás
CPaaS	Alkalmazásprogramozási felületeket biztosító felhő alapú platform
AR/VR	Kiterjesztett/virtualis valóság

1. Bevezetés

A dolgozatom elsődleges célja, hogy áttekintse a napjainkban divatos I4.0 kifejezés értelmezésének -adott feltételrendszer- szerinti kialakítását, majd megvizsgáljam a modern gyártási eljárások részeként a mérőeszközök segítségével kapott, elemzett adatok IT integrálhatóságának lehetőségeit. Ezek a témakörök mind a gépészeti mind az általános mérnöki tudományokhoz kapcsolódnak, a megmunkálási folyamatok, mérési technikák és szerszámgépek pontosságának javítására, illetve hosszútávú fenntartható működésükre irányulnak.

Ezek a vizsgálatok, adatelemzések hosszabb távon folyamatbiztonságot, illetve a folyamatok fejlesztését jelentik, ezáltal a selejtek csökkenését, a vállalat által előállított értéket növelik. Manapság sajnos egyik oldalon az I4.0 kifejezés egy elhasznált, vagy rosszul értelmezett és megítélt folyamat, míg a másik oldalon egy átláthatatlan, túlságosan bonyolultnak tartott, szinte elérhetetlen rendszer. Dolgozatom elkészítésénél elsődleges fontosságúnak tartottam azt a célkitűzést, hogy közérthetővé tegyem az I4.0 alapfogalmait, segítsem az ipari szereplők számára az új mérési és kiértékelési eljárások megértését, használatát és hasznosítását.

1.1. Kutatási terület bemutatása, célkitűzés

Kutatásom célja kezdetben kapcsolódik a különböző munkadarabok satupofák deformációi háttérkörnyezetének modellezésével kinyert adatok elemzéséhez. A kutatás során vizsgálat alá került a munkadarab és a satupofák deformációja, szimulációs szoftver segítségével modellezésre kerültek a megfigyelt deformációk.

Folytatásként az ipari környezetben szervesen kapcsolódó CNC megmunkáló gépek mérőrendszereinek pontossága került a fókuszba. A kutatás a CNC megmunkáló gépekbe integrált vezeték nélküli, optikai adatátviteli elven működő tapintó mérőrendszerek pontosságának ellenőrzésére és határainak kitolására irányul. A megmunkológépek pozicionálási pontosságának növelése érdekében külső mérőrendszer általi kontroll mérések elvégzése történt.

Ezt követően a lézerscanner és klaszteranalízis alkalmazására került sor. A kutatásom ezen szakaszában a figyelem a lézerscanner adatok pontosságának ellenőrzésére és klaszteranalízis segítségével a felületi hibatérképek meghatározására irányult.

A kutató jellegű munkám ezután a különböző mérőeszközök és eljárások teljesítményének, illetve pontosságának összehasonlítására, valamint az adatfúzió alkalmazásával szerszámkopás modellezésére és előrejelzésére összpontosít, majd a Ballbar mérés vizsgálatával foglalkoztam.

A Ballbar mérés alkalmazásának fejlesztésére irányuló kutatási törekvéseim a szerszámgépek pontosságának és állapotának felmérésére, az adatok időrendűségének kezelésére és a gép korrekciós tényezőinek meghatározására összpontosított.

Összefoglalva a dolgozatom elsődleges kibontakozási iránya, hogy részletesen áttekintsem az I4.0 (Ipar 4.0) kifejezés értelmezésének feltételrendszerét, különös tekintettel annak alkalmazási lehetőségeire a modern gyártási eljárásokban. Az I4.0 koncepciója magában foglalja a digitalizáció, az automatizálás és az adatcsere integrálását a gyártási folyamatokba, amely lehetővé teszi a hatékonyság és a termelékenység növelését. Az IT integrálhatóság magában foglalja az adatgyűjtés, az adatelemzés és az adatok valós idejű feldolgozásának módszereit, valamint az ezekhez kapcsolódó informatikai rendszerek és szoftverek alkalmazását. A gyártási folyamatok valós idejű monitorozása és optimalizálása hozzájárul a termelési hatékonyság növeléséhez és a hibák csökkentéséhez.

1.2. Alapvető problémák feltárása, elemzése

Az I4.0 feltételrendszer kidolgozásában az európai gazdaság jelentős előnnyel indult a 2010-es évek elején. Ezek voltak a diesel gate előtti évei a VW konszernnek is, amikor rövid ideig, de mégis a világ legnagyobb autó gyártói lehettek [1]. A növekedés kiszámítható volt és stabil. Sajnos ez napjainkra, köszönhetően a növekvő energiaáraknak, feltörekvő távol keleti versenytársaknak, komplex politikai helyzeteknek, elvárásoknak egyre nehezebb [2]. Az így kimerülő erőforrásokkal rendelkező piaci szereplők számára még nehezebb megérteni az I4.0 előnyeit, hasznosságát, szükségességét és megkerülhetlenségét. A vállalati szereplők legnagyobb tudományos és technikai kihívása nem csupán az új technológiai fejlesztésekkel kapcsolatos kutatások elvégzése, hanem az elérhető, vagy szükséges fejlesztések nyomon követése, beépítése a saját folyamataikba, innovációs tevékenységükbe. A megnövekedett információáramlás miatt ez egyre nehezebben kivitelezhető [3]. A nagyvállalatok kivétel nélkül reagáltak erre a kihívásra, több-kevesebb sikerrel. A folyamatok kifutása és a gyorsan változó gazdasági körülmények között ezeknek a kiértékeléséhez azonban hosszabb időre van szükség.

Térségünk iparának fontos szereplői, számuk és teljesítményük miatt, a kis és közepes vállalkozások. Sokszor családi, baráti vagy egyéb közösségi összefogásból fejlődnek ki, emiatt hierarchikus és döntéshozatali rendszerük szinte minden esetben kivétel nélkül egyedi. Az általuk megtermelt javak is széles skálán mozognak, mint darabszám és mint komplexitás szerint. Az európai politika egyik fontos elemét a „green deal” és a barnamezős beruházások gazdasági hatását sem szabad figyelmen kívül hagyni [4]. A családi vállalkozások esetében a gyakorlatban sajnos sokszor a problémamegoldás úgy néz ki, hogy érkezik egy komoly külső gazdasági vagy technológiai kihívás, amelyet a vállalat jellemzően nem megold, hanem egyszerűen a tulajdonos a vállalat felszámolása, vagy értékesítése mellett dönt, majd ezt követően egyszerűbb befektetések felé fordul. A megszokott jóléte továbbra is biztosítva marad, azonban a vállalathoz köthető családok és mikroközösségek megélhetése megszűnik. A beszállítói lánc is arrébb mozdul és akár a teljes kontinens elhagyására kényszerül. Ennek elkerülése érdekében mindig a LEAN elveknek megfelelően kell a teljes értékteremtő folyamatot kialakítani és fejleszteni, az I4.0 feltételrendszer és ajánlások figyelembevételével [5]. Szeretném, ha dolgozatomban ezeknek a kis és közepes vállalkozásoknak nyújtaná hasznos segítséget a különböző rendszerekben rejlő lehetőségek megismeréséhez, megértéséhez és szükség esetén implementálásához.

Ezek a témakörök szorosan kapcsolódnak a gépészeti, mérnöki tudományokhoz, különösen a megmunkálási folyamatok, mérési technikák és szerszámgépek pontosságának megértéséhez. A dolgozatomban bemutatom, hogyan lehet a modern mérőeszközökkel nyert adatokat felhasználni az informatikai rendszerek segítségével, továbbá hogyan lehet a kapott adatokat felhasználni a gyártási folyamatok optimalizálására és a folyamatok pontosságának növelésére.

1.3. A doktori disszertáció felépítése

Dolgozatom a **bevezetés** fejezetével indul, ahol bemutatásra kerül a kutatási motiváció és annak háttere, részletezem a kutatási kérdéseket és célokat, valamint röviden érintem a dolgozatban megjelenő alkalmazott kutatási módszertant is.

A következő fejezetben az **irodalomkutatás**ban ismertetésre kerülnek a kapcsolódó korábbi kutatások, valamint a kötődő elméleti hátttereket.

A **kutatási módszertan** fejezetben részletezésre kerülnek az alkalmazott kutatási módszerek, kutatási tervek és célkitűzések. Kifejtésre kerülnek az adatgyűjtési módszerek körülményei és azok hátterei, valamint bemutatásra kerülnek az elemzés módszerei is. Ezek után a vizsgálati **eredmények** kerülnek bemutatásra, táblázatokkal, ábrákkal és grafikonokkal szemlélítve az adatokat. Ennek a fejezet végén pedig felsorolásra kerülnek a kutatásomhoz kapcsolódó tézispontok is.

Az **összefoglalás** fejezet értékeli a kutatás során kapott eredményeket és röviden levonja a következtetéseket. Tárgyalja, hogy az eredmények hogyan illeszkednek a meglévő tudáshoz és milyen hatásuk van a kutatási kérdésekre. Ebben a fejezetben összegzésre kerülnek továbbá a kutatással kapcsolatos főbb megállapításokat, javaslatokat téve a kapcsolódó jövőbeli kutatásokra nézve.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Ipari forradalmak rövid áttekintése

Az ipari forradalom komplex gazdasági-társadalmi átalakulás. Az iparhoz vagy az agrárszektorhoz kapcsolódó infrastruktúra forradalma, miközben demográfiai, társadalmi, strukturális és urbanizációs forradalom is lezajlik [6]. Az ipari forradalmak – eddig kb. 300 éven át folytatódó története – különböző szakaszokra osztható. A szakirodalomban elterjedt tagolás 3, illetve a jelenleg kibontakozóval együtt 4 ipari forradalmat különböztet meg.:

1. ipari forradalom;

1760-as évektől az 1840-es évekig zajlott.

Az 1. ipari forradalom a 18. század végén indult Nagy-Britanniában, és alapvetően átalakította a gazdaságot, a társadalmat és a mindennapi életet. Központi elemei az új anyagok, az új energiaforrások (például a gőzgép) és a gépesítés, amelyek hatékonyabb termelést és modern munkaszervezési formákat eredményeztek. Az ipari fejlődés olyan találmányokat hozott, mint a szövőgép, a fonógép és a gőzgép, amelyek elterjedésével Nagy-Britannia a technológiai fejlődés élére került. A közlekedésben a gőzhajók és a vasutak, például Stephenson gőzmozdonya, jelentős előrelépést hoztak, míg a hírközlésben Morse távírógépe forradalmasította az információátvitelt. A bányászat és a kohászat fellendülése főként a vasút szén- és vasigényének volt köszönhető, miközben a gépgyártás és a szabványosítás is alapjaiban változtatta meg az ipari termelést. A mezőgazdaság gépesítése és az orvostudomány fejlődése, például a védőoltások elterjedése, hozzájárult a népességnövekedéshez és a demográfiai robbanáshoz. A városiasodás felgyorsult, Anglia népességének fele 1850-re már nagyvárosokban élt, ami társadalmi átalakulásokat és városrészek elkülönülését eredményezte. Az ipari forradalom egyszerre hozott gazdasági növekedést és jelentős társadalmi különbségeket, amelynek kiváló példái a luxus és nyomornegyedek [7].

2. Ipari forradalom;

1870-es évektől az első világháborúig tehető.

A második ipari forradalom (1871–1914) jelentős technológiai és gazdasági fejlődést hozott, különösen a vegyipar, az elektromosság, az olajipar és az acélgépgyártás területén. Az árucikkek tömegtermelése gépesítette az élelmiszerek, ruházati cikkek, valamint a korai rádiók és gramfonok előállítását.

A növekvő lakossági igényeket kielégítve a folyamat munkahelyeket teremtett. Ez az időszak a szolgáltató ipar (harmadik szektor) felemelkedésével is jellemezhető. A világgazdasági centrum átrendeződött: Németország és az Egyesült Államok váltak vezető hatalommá, miközben Európa számos régiója ekkor lépett be az ipari fejlődés korszakába. Németországban 1789-1914-ig tartó időszakban a mezőgazdaságban dolgozók aránya 2/3-ról 1/3-ra esett vissza [8]. Németországban és az USA-ban a vegyipar és gépipar fejlődött kiemelkedően, míg Magyarországon az élelmiszeripar és a vasúti gépgyártás játszott fontos szerepet. Az iparosodás terjedése földrajzi és politikai változásokkal is összefonódott, például a német és olasz egység, valamint az osztrák-magyar kiegyezés nyitotta meg a lehetőséget az ipari fejlődés előtt. A tőkekoncentráció révén monopóliumok és nagyvállalatok jöttek létre, miközben az ipar finanszírozásában az erős bankrendszer játszott központi szerepet. A tömeggyártás és a technológiai fejlődés mérföldkövei közé tartozott a Bessemer-konverter által lehetővé tett olcsó acélgyártás [9], az elektromos áram ipari alkalmazása. Ebben az időszakban indult meg az amerikai Ford autógyár által elsőként bevezetett futószalagos termelés a Ford T Model gyártásával [10]. Az elektromosság terén jelentős magyar találmányok születtek, például Déri Miksa, Bláthy Ottó és Zipernowsky Károly (1885) transzformátora [11].

A közlekedésben megjelent a repülőgép a Wright fivéreknek köszönhetően, akik 1903-ban hajtották végre első repülésüket [12]. A hírközlést szintén forradalmasították a korszak találmányai, mint a telefon és a rádiótechnika [13].

A második ipari forradalom globális hatásai közé tartozott a városiasodás és a fogyasztói társadalom kialakulása, amely az árucikkek széles körű elérhetőségét és új társadalmi szokások megjelenését eredményezte.

3. Ipari forradalom;

20. század második felétől nagyjából a 2000-es évekig tartott.

A harmadik ipari forradalom alapja „sajnos” a második világháború volt, így az egyik első találmányként is a Manhattan projekt keretében megjelent atombombát tekintjük [14]. Az új gyártási megoldásoknak köszönhetően megváltozott a korábban használt alapanyagok felhasználási módja, amely egy szignifikáns technológiai fejlődést eredményezett. Ennek egyik eredményének tekinthető az 1946-ban megjelent első programozható számítógép, az ENIAC [15]. A harmadik ipari forradalma laikusként könnyedén elképzelhetjük, ha ránézünk egy modern gyár belsejébe. Amint a gépeket részletesebben szemléljük, tömegében inkább univerzális gyártógépeket, PLC vezérlést találunk bennük.

Az első PLC a General Motorsnál jelent meg 1968-ban, s ezt követően viszonylag rövid időn belül a világ műszaki élvonalába tartozó gyártók, mint a SIEMENS, FANUC, OMRON is megjelentek saját egységeikkel [16]. A korszakot továbbá jól reprezentálja az SR71 Blackbird -amely már akkor radarelnyelő bevonattal rendelkezett-, a hidegháborús fegyverkezési verseny, illetve a Holdraszállás [17]. Egyik legfontosabb új gondolkodásmód a LEAN megjelenése, amelyet először a Toyota alkalmazott, Toyota Production System (TPS) néven, és már az 50-es években elkezdődött a fejlesztése [18]. Az időszak végét már gyártásautomatizálás, optimalizált folyamatok, jellemzik.

4. Ipari forradalom;

2000-es évek elejétől folyamatosan, így napjainkban is zajlik.

Az Ipar 4.0 egy olyan koncepció, amely az újkeletű társadalmi kihívásaira ad válaszokat, mégpedig elsősorban az ipari folyamatok teljes digitalizációjával, üzleti folyamatok paradigmaváltásával. A negyedik ipari forradalmat a különböző technológiák fúziója jellemzi, mely elmosza a határvonalat a fizikai, digitális és biológiai területek között, így a különböző tudományágak, gazdaság és az ipar átalakítása mellett az emberi lény mibenlétének kérdését is felveti [19]. Az innovációk között kiemelkedő szerepet kap a mesterséges intelligencia, a robotika, az IOT, az önvezető autók, a 3D nyomtatás, valamint a nanotechnológia és kvantumszámítás [20, 21]. Az új technológiák lehetővé teszik a kisüzemi, rugalmas termelést, ami növelheti a fejlődő világok gazdasági potenciálját, ugyanakkor az automatizáció a fejlődő országokban növekvő munkanélküliséghez vezethet, különösen az alacsony képzettségű munkahelyek megszűnése révén [22]. Európa ipari pozíciói az elmúlt évtizedekben gyengültek, azonban az ipar 4.0 alapú újraiparosítás visszafordíthatja ezt a trendet, különösen, ha a környezetbarát és etikus gyártási megoldásokra helyezik a hangsúlyt. Ázsiában az infrastruktúra fejlődése rendkívül eltérő színvonalú, de ez lehetőséget ad fenntartható, megújuló energián alapuló rendszerek kiépítésére, elkerülve a nyugati világ hibáit. Az oktatás kritikus szerepet játszik az ipar 4.0 vívmányainak hasznosításában és az automatizálás okozta problémák mérséklésében, hiszen magasabb képzettséggel a munkaerő könnyebben alkalmazkodik az új kihívásokhoz. Európa számára az etikus és ökológikus gyártás, valamint a robotika alapú innovációk jelenthetnek kiemelt fejlesztési lehetőséget, különösen az európai fejlesztésű és gyártású technológiák integrálásával. Az ipar 4.0 által kínált megoldások a gyártás racionalizálásán túl a környezeti károk csökkentését és a társadalmi felelősségvállalás erősítését is elősegíthetik [23].

2.2. Számítógépes rendszerek a gyártásban – történelmi áttekintés

Az emberiség az első kőszerszám elkészítése óta rendelkezik a gyártással kapcsolatos adatokkal. Ezen adatok összetettsége, mérhetősége változott az idők során. Az első futószalag megjelenésekor a háttérben már összetett gyártórendszerrel és vállalati struktúráról beszélhetünk. A sorozatgyártás hatását legjobban úgy érzékeltethetjük, hogy Ford T modell megjelenése 1904. év végén, 120 éve volt, majd a gyártásnak már a következő évben 1905-ben költöznie kellett a gyártás felfutása miatt egy nagyobb épületbe. Az így létrejött megoldások, az elektromos áram használata, így az éjszakai műszakok megjelenése és feltöltése nagyfokú hatékonyságnövekedést és termelési számokat eredményezett. A nagy szériák pontos, precíz összeállítása sajnos a gazdaságban is érzékeltette hatását, mivel az 1930-as évekre már túltermelési válsággal kellett az emberiségnek szembenéznie [24]. A második világháborús színterek mögött zajló ipari összecsapása nagyon érdekes, sokrétű, mégis kevésbé, vagy alig tárgyalt terület. Tekintsük csupán a repülőgépeket, néhány év alatt a Messerschmitt 31 db bf 109-es variánst alkotott meg, mindezt 7 különböző gyártási helyen elkészítve. A német ipar többféle motort és sárkányt is sorozatban gyártott, különböző anyagminőségek, kialakítások és alkatrészek felhasználásával. Már a karbantartás is nagy kihívás lehetett nem beszélve a háborús körülmények közötti anyagbeszerzésről, gyártás és logisztikai kérdésekről. Eközben a szövetséges erők kezdetben az ellátási lánc elemeit, majd magát a gyárakat, lakóépületeket is bombázzák. A manufaktúris gyártás képtelen volt felvenni a harcot a sokkal fejlettebb és összetettebb amerikai gyártási rendszerekkel. Az igény már itt is felmerült termeléstámogató és tervező rendszerekre, azonban az IT háttér hiánya miatt, ez nem volt megoldható. A korábban említett 3. ipari forradalomban megjelenő NC numerical control -nak köszönhetően már voltak rendelkezésre álló adatok, azonban ezek feldolgozása még messze nem a ma elképzelt szinten volt. A megjelenő igényt először elméletben a 70-es években írták körül, mégpedig 1973-ban Harringtontól származik az első megfogalmazás, amelyet az általa írt könyvben fogalmaz meg és címadóként alkalmazza: Computer Integrated Manufacturing, vagyis számítógéppel integrált gyártás, vagy számítógépes gyártás [25]. A koncepciót tovább fejlesztették, így 1989-ben a TMEH Tool and Manufacturing Engineers Handbook-ban már komolyan foglalkoznak a megvalósításával. A köztük eltelt idő számos változást hozott, azonban ezek nem válhattak szélekkörűvé, mert nem volt meg a kellő IT háttér a megvalósításhoz. A 80-as évektől az IT háttér megerősödésének köszönhetően már gyakorlatban is alkalmazták az elméletben megfogalmazott adatgyűjtést, az akkori fejlett iparágakban, mint repülőgépgyártás, autóipar, gépgyártás.

A 4. ipari forradalommal kapcsolatos problémák sokrétűek, ugyanakkor már ekkor is említésre került, hogy a vállalatok, amelyek elhivatottan foglalkoztak ezzel a koncepcióval, milyen előnyökre tehettek szert. Ezek a következők:

The Benefits of CIM Implementation			
Reduction in engineering design cost	15-30%	Increased productivity of production operations (complete assemblies)	40-70%
Reduction in overall lead time	30-60%	Increased productivity (operating time) of capital equipment	2-3 times
Increased product quality as measured by yield of acceptable product	2-5 times previous level	Reduction of work in process	30-60%
Increased capability of engineers as measured by extent and depth of analysis in same or less time than previously	3-35 times	Reduction of personnel costs	5-20%

1. ábra CIM bevezetésének előnyei [26]

A táblázat 1989-ben készült, és az 1984-ben elhivatottan CIM elveket és gyakorlatot valló vállalatok által elért eredményeket mutatja, amelyeket elnézve nagyon potens a kezdetben még nehéznek tűnő átalakulás is. A fejlesztések és idő előrehaladtával megjelentek az ERP *Enterprise Resource Planning* és MES *Manufacturing Execution System* rendszerek is [27]. Az ERP teljeskörű integrációra vonatkozik, így a teljes értéklánc kezelésében részt vesz. A MES csak a gyártás ütemezésére, így a shopfloor és a menedzsment szintje közt teremt elsősorban összeköttetést [28].

2.3. Ipar 4.0 koncepció felépítése

Az ipar 4.0 hatalmas lehetőségeket tartogat kivétel nélkül, minden iparág számára. Napjainkban a termelő vállalatoknak a legmagasabb minőségben, a lehető leghatékonyabban kell a termékeiket gyártani annak érdekében, hogy megőrizték versenyképességüket és kielégítsék a folyamatosan növekvő vevői elvárásokat. A fenntartható gazdaságosság egyik kulcsa minden vállalat számára a minőségmenedzsmentre való összpontosítás, amely mellett egyre inkább előtérbe kerülnek a költségek csökkentésére irányuló törekvések. A vállalat erősségének és gyengeségének megértésével optimalizálható az üzleti modell a megfelelő piaci potenciál elérése érdekében.

A negyedik ipari forradalom egyik alapelemei a kiber-fizikai rendszerek (CPS), amelynek a teljes ellátó rendszer menedzsmentjére kell összpontosítani. Ez az összetett hálózat minden elemétől megköveteli a működés közbeni adatrögzítést.



2. ábra Ipar 4.0 koncepció felépítése [30]

Az elkövetkező években az intelligens gyárakat a folyamatok integrációja és valós idejű kontrollálhatósága fogja jellemezni. Magyarországon jelenleg a kormány által kiadott stratégia 10%-os évenkénti hatékonyságjavulást tűzött ki célul. [31]

Az önszervező gyártás biztosítása érdekében első lépésként lehetővé kell tenni az üzem vagy termelési egység információs rendszerének vertikális integrációját. A vertikális integrációnak alapvető tulajdonsága, hogy az érzékelő és működtető jelek az összes szinten megjelennek. Ezek a digitális hálózatok az erőforrás tervezés és a gyártás-végrehajtási rendszerek szoros kapcsolatán alapulnak.

Az ipar 4.0 további előnyei közé tartozik a termelési folyamatok automatizálása és a mesterséges intelligencia alkalmazása, amelyek révén a vállalatok képesek lesznek gyorsabban és hatékonyabban reagálni a piaci változásokra. Az adatelemzés és a prediktív karbantartás segítségével a gyártási folyamatok optimalizálhatók, csökkentve a leállások számát és növelve a termelékenységét. Az ipar 4.0 technológiák alkalmazása lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy rugalmasabbá váljanak, és jobban alkalmazkodjanak a vevői igényekhez, ezáltal növelve a versenyképességüket a nemzetközi, illetve a globális piacon.

A gyártás digitalizálása következtében rengeteg adat rögzítésre kerül, ami speciális elemzési eljárásokat és nagy számítási kapacitást igényel.

Itt kerül előtérbe a klaszterezés, egy, -adott esetben- felügyelet nélküli gépi tanulási módszer, amely nagyobb adathalmazokban a hasonló adatpontok azonosítására és csoportosítására szolgál, anélkül, hogy a konkrét eredményre tekintettel lenne. A klaszterezést (néha klaszterelemzésnek is nevezik) általában arra használják, hogy az adatokat könnyebben érthető és kezelhető struktúrákba sorolják. Érdemes szem előtt tartani, hogy bár népszerű stratégiáról van szó, a klaszterezés nem egy önálló kifejezés, mivel több olyan algoritmus létezik, amely különböző mechanizmusokkal alkalmazza a klaszterelemzést [32].

Önmagában az adatokhoz való hozzáférés nem jelent előnyt, a megfelelő algoritmusokkal történő elemzéshez jól alkalmazható és hatékony módszertan szükséges. A döntéshozatalban és a gyártási folyamatok fejlesztésében és a versenyképesség növelésében az adatok elemzésének kulcsfontosságú szerepe van. Az Ipar 4.0 megvalósítása a kiber-fizikai rendszereken alapszik, amelyek olyan termelő üzemekből, raktárakból, intelligens gépekből állnak, amelyek a korábbi adatcsomagok elemzéséből folyamatokat indítanak el, ezáltal autonóm módon képesek együtt folyamatokat végezni.

A klaszterezés mellett az adatelemzés más módszerei is fontos szerepet játszanak a gyártás digitalizálásában. Például a prediktív elemzés lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy előre jelezzék a lehetséges problémákat és megelőző intézkedéseket tegyenek, ezáltal minimalizálva a leállások számát és növelve a termelékenységét. Az adatok valós idejű elemzése pedig lehetővé teszi a gyártási folyamatok folyamatos optimalizálását és a gyors döntéshozatalt.

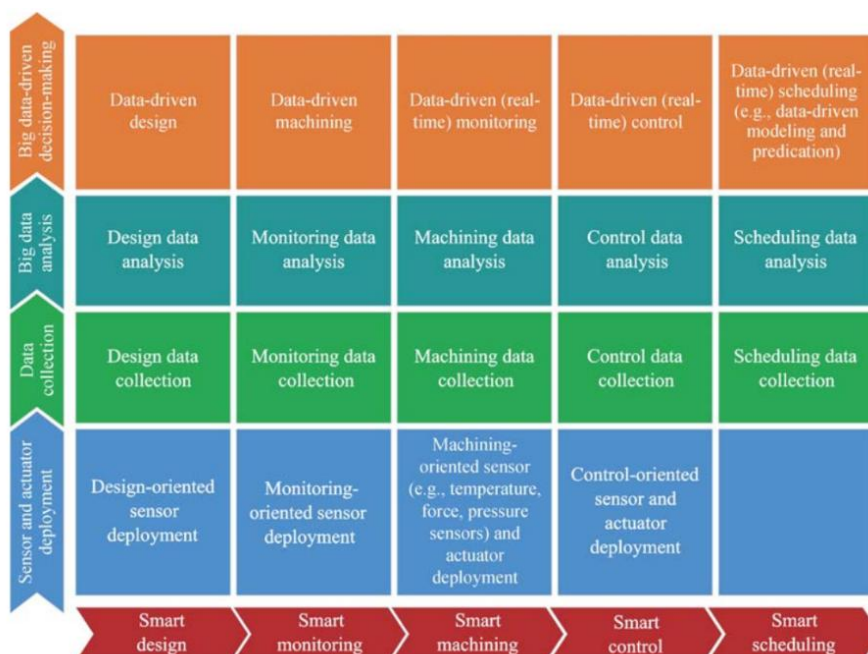
Az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása révén a vállalatok képesek lesznek jobban kihasználni az adatokban rejlő lehetőségeket, és ezáltal növelni versenyképességüket. Az intelligens gyárakban az adatok folyamatos gyűjtése és elemzése lehetővé teszi a gyártási folyamatok finomhangolását és a hatékonyság növelését. Az adatok elemzése és a gépi tanulási algoritmusok alkalmazása révén a vállalatok képesek lesznek gyorsabban és pontosabban reagálni a piaci változásokra, és jobban alkalmazkodni a vevői igényekhez.

A CPS általában két fő komponensből tevődik össze. A fejlett kommunikációs kapcsolatból, amely valós idejű adatgyűjtést biztosít a fizikai világból és visszajelzést a kibertérből, illetve az intelligens adatmenedzsmentből, amely a számítógépes háttér elemzési képességéből és számítási teljesítményéből áll. Ez a két összetevő önmagában teljesen elméleti és nem elegendő a gyakorlatba ültetéshez.

A megfelelő minőségű és megbízható, adott esetben ellenőrzött, vagy szűrt adatok összegyűjtése a gépekből és a termékjellemzőkből az első lépés a CPS alkalmazásával. A megfelelően biztosított adatok alkalmazásával a gyártás flexibilitása tovább növelhető [33]. Az adatok lehetnek közvetlen módon szenzorokkal mérve, majd hálózaton keresztül gyűjtve, vagy a gépek vezérlőiből meghatározott időszakonként lementve [34]. Az integrációt tekintve meg kell különböztetnünk vertikális és horizontális integrációt.

A vertikális integráció során az adatok az érzékelőktől és működtetőktől egészen a vállalati szintű rendszerekig áramlanak, biztosítva ezzel a teljes gyártási folyamat átláthatóságát és irányítását. Ez lehetővé teszi a valós idejű döntéshozatalt és a gyors reagálást a gyártási folyamatokban felmerülő problémákra. A horizontális integráció ezzel szemben a különböző gyártási egységek és rendszerek közötti adatáramlást biztosítja, elősegítve ezzel a különböző gyártási folyamatok közötti együttműködést és koordinációt.

A CPS alkalmazása révén a gyártási folyamatok nemcsak hatékonyabbá és rugalmasabbá válnak, hanem lehetővé teszik az új üzleti modellek és szolgáltatások kialakítását is. Az adatok valós idejű elemzése és a prediktív karbantartás révén a vállalatok képesek lesznek előre jelezni a lehetséges problémákat és megelőző intézkedéseket tenni, ezáltal minimalizálva a leállások számát és növelve a termelékenységét. Az intelligens gyárakban az adatok folyamatos gyűjtése és elemzése lehetővé teszi a gyártási folyamatok finomhangolását és a hatékonyság növelését.



3. ábra Ipar 4.0 keretrendszer felépítése [36]

2.3.1. Vertikális integráció

A negyedik ipari forradalom jellemzője a hatalmas mennyiségű adat, amely a gépek, erőforrások és termékek szoros hálózatba kapcsolásával keletkezik a teljes értéklánc mentén. Korábban nem volt lehetőség a különböző forrásokból származó adatok egyesítésére, de most, hogy ez elérhetővé vált, a minőségmenedzsment számos új lehetőséget kínál az információk felhasználására. Az új adatok segítségével lehetővé vált a gyártási folyamatok nyomon követése [29].

A virtuális minőségmenedzsment alapelve, hogy az összes gépről és termékről származó információ mellett figyelembe veszi azokat a környezeti hatásokat is, amelyek potenciális veszélyt jelenthetnek a minőségre. Szimulációk és modellezések révén minőségi folyamatparaméterek nyerhetők ki és optimalizálhatók tovább. Ezenkívül lehetőség van a folyamatláncok tesztelésére és optimalizálására még a valós fizikai megvalósítás előtt. Így az egymással kölcsönhatásban lévő gépek és termékek által szolgáltatott adatok hatalmas lehetőségeket kínálnak mind a kutatás, mind az alkalmazás terén, mivel nagy hozzáadott értéket biztosítanak a különböző termékek és rendszerek számára élvonalbeli technológiák alkalmazásával [35].

A vertikális integráció lehetővé teszi, hogy az ellenőrzési és diagnosztikai adatok a termelési szintekről a döntéshozatali szintekre és vissza áramoljanak. Az ipar 4.0 koncepciója fejlett diagnosztikai lehetőségeket és a gépek állapotának előre tervezhető vagy megelőző karbantartását is lehetővé teszi.

2.3.2. Horizontális integráció

A horizontális integráció révén számos új üzleti modell válik elérhetővé a vállalatok számára. Az ügyfelek például igénybe vehetik a valós idejű nyomon követési szolgáltatásokat, hogy megismerjék megrendelésük aktuális állapotát. Ez lehetővé teszi, hogy a vevők az utolsó pillanatban módosítási kérélmeket nyújtsanak be, amelyekre a gyártás azonnal reagálni tud. A gyártási rendszerek különböző szintjein megfogalmazott stratégiai és operatív célok között összetett kapcsolat áll fenn, ami akadályozhatja az intelligens gyártási rendszer megvalósítását. Ennek kezelésére alkalmazzák a Stevens-modellt, amely segít azonosítani a gyártási rendszer azon aspektusait, amelyek stratégiai tervezés célpontjaiként szolgálnak, miközben sztenderdizált technikákat és agilis forgatókönyveket alkalmaznak operatív célként.

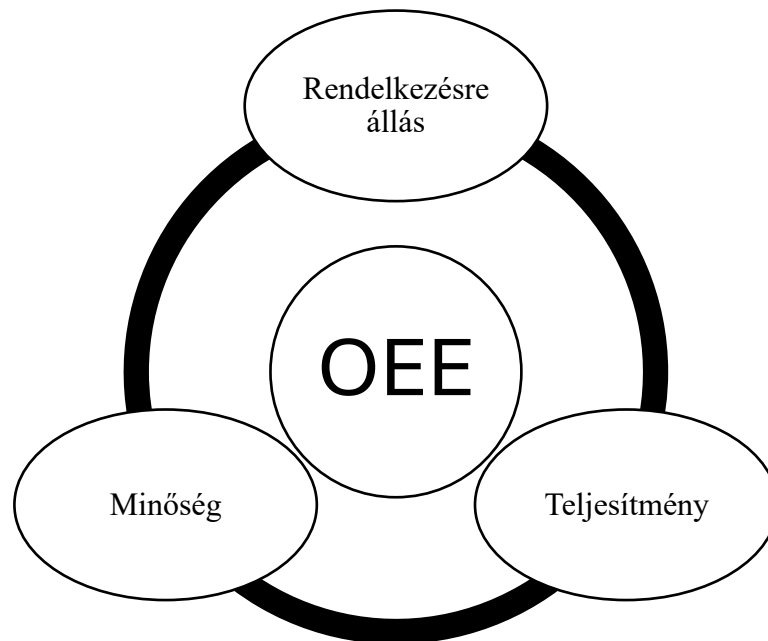
Az iparági fejlesztések alapját mindig a jelenlegi helyzet elemzése és a környezeti vizsgálatok képezik, amelyek meghatározzák a célokat és a figyelembe veendő stratégiákat [36]. Ezért elengedhetetlen egy integrációs koncepcionális modell kidolgozása, amely leírja a gyártási műveletek irányítási tevékenységeit és a vállalati szintet, valamint megjeleníti a fizikai rendszert, és explicit interfészt biztosít az optimális irányítás elemzéséhez.

A szoros horizontális integráció a teljes beszállítói lánc mentén lehetővé teszi a tevékenységek vevőspecifikus összehangolását, biztosítva, hogy a gyártó berendezések csatlakozzanak a felhőalapú platformokhoz, ahonnan szükséges adatokat nyerhetnek ki [37].

2.3.3. Átfogó eszközhatékonyság

Az évek során számos módszert fejlesztettek ki a gyártás irányítására. Az idő, energia, magas költségek és a munkavállalók leterheltsége olyan kihívások, amelyekkel minden vállalat szembesül. Az OEE (Overall Equipment Effectiveness) egy gyakorlati módszer a gépek hatékonyságának mérésére. Egyszerű és közérthető információkat nyújt, valamint segít a komplex gyártási problémák csökkentésében. Támogatja a folyamat szisztematikus átvizsgálását és a gépek potenciális problémáinak azonosítását [38]. Az OEE-t általában a termelés teljesítményének mérésére használják. A mérés több szinten is alkalmazható a gyártási környezetben, és viszonyítási alapként szolgálhat a gyártás kezdeti szakaszában. Az induló fázisban mért értékek összehasonlítása a gyártás jövőbeli OEE értékeivel mennyiségi javulást mutat. Ezen kívül használható egy adott gyártósor hatékonyságának mérésére is, amely lehetővé teszi az üzemben belüli viszonyítást [41]. A működési idő az a maximális időintervallum, amely alatt elméletileg gyártani tudunk. Ahhoz azonban, hogy a tényleges gyártási időt megkapjuk, le kell vonnunk az összes megállás idejét, legyen az tervezett vagy nem tervezett. Ezen két idő arányából számíthatjuk ki a rendelkezésre állási mutatót.

A teljesítménymutató meghatározásához ismernünk kell a gép normáját, amelyet a gyártási idő alatt elkészült darabszámmal tudunk meghatározni adott termék esetén. Ez az érték a gép 100%-os kihasználása alapján van meghatározva, ami hosszú távon valószínűleg nem fenntartható.



4. ábra Az OEE mutató komponensei

A minőségi mutató azt az értéket jelzi, hogy a ténylegesen legyártott mennyiségből mekkora rész nem kapott selejt minősítést az első minőségellenőrzési fázis során [40].

2.3.4. Környezetvédelem

A digitalizáció jelentős mértékben hozzájárulhat a European Green Deal (Európai Zöld Megállapodás) céljainak eléréséhez és a gyártás környezeti hatásainak csökkentéséhez. Egyrészt tiszta technológiai megoldások forrása lehet, másrészt csökkentheti a digitalizáció saját szén- és anyaglábnymát. Ez az új ipari stratégiában is tükröződik, amelyet az EU azért dolgozott ki, hogy támogassa az európai ipart a klímasemlegesség és a digitális vezető szerep felé vezető kettős átmenetben [41].

Az Ipar 4.0-ban, -akárcsak a mai iparágakban- elengedhetetlen a környezettudatosság, a természeti erőforrások tudatos és megfelelő felhasználása, a fizikai erőforrások optimalizálása, valamint a hulladék keletkezésének minimalizálása és újrahasznosítása. Az ipar 4.0 környezetvédelmi menedzsmentje ugyanolyan fontos, mint az innovációs potenciál, mivel iránymutatásokat kell meghatározni felügyelni kell az intézkedéseket.

Az adatok gyűjtésének és elemzésének köszönhetően nyomon tudja követnie a folyamatokat, hogy azok összhangban legyenek a környezetbarát és fenntartható ipari profillal [42].

2.3.5. KKV-k, Ipar 4.0 érettségi szintek, hatások

A mikro- és kisvállalkozások részéről sokan még mindig kételkedők a 4. ipari forradalommal szemben. Egy egyszerű példával szemlélítve az, hogy egyes szereplők nem használták a villamos áramat nem azt jelentette, hogy még nem elérhető, hanem azt, hogy ők nem használták. Ezzel csak a saját fejlődésüknek szabtak gátat, a folyamatokat maximum lokális szinten lassították. Az Ipar 4.0 megnevezést a Német Oktatási és Kutatási Minisztérium vezette be először, viszont ez nem jelenti azt, hogy csak ebben az országban zajlik ez a fajta átalakulás, illetve láthattuk, hogy valójában az 1970-es évekig visszanyúlnak az elvi alapjai. Az idő múlásával rendre jönnek a további országok, illetve gazdasági tömörülések megnevezései az új ipari forradalomra, például az USA, amely Smart Manufacturing, illetve az Egyesült Királyság, amely Future of Manufacturing megnevezést alkalmaz [43].

Az ipari forradalmak aktuális vívmányainak alkalmazására jó példa a korábban említett második ipari forradalom, amely valójában Angliában és a Brit Birodalom területeinek egy részén, illetve Amerikában játszódott le teljes mértékben. A többi ország vagy megfigyelő volt csak, vagy részben implementálta a folyamatokat, vívmányokat. Ugyanez igaz ma is, attól, hogy egy cég CNC gépeket, robotokat használt, az csak a 3. ipari forradalom szintjét éri el, de ezek a technológiai újítások már a 70-es évek óta elérhetőek. Manapság a számítástechnikai fejlettségnek köszönhetően az elérhető adatok feldolgozása megengedi, hogy valamilyen szinten minden vállalat használhassa ipari forradalom eszközeit, és élvezhesse vívmányait.

Az Ipar 4.0 megnevezést ebben a formában először a Német Oktatási és Kutatási Minisztérium használta, amikor meghatározott egy forgatókönyvet. Ezzel szemben támasztott legfontosabb követelmény, hogy hivatott biztosítani a jövőben a német állam, és rajta keresztül az egész Európai Unió sikerességét [44]. Az ipar előrébb járt a koncepció kidolgozásával, mint a politikai háttér, emiatt érdekes, hogy a Deloitte és Fraunhofer Intézetek szinte azonos időben, már a 2014-es évben közreadták publikációjukat a negyedik ipari forradalommal kapcsolatban [45]. A jelenlegi ipari környezetben ezt az áttörést a meglévő rendszerek megfelelő kombinálásával, ezáltal komplex gazdasági és társadalmi szervezet kialakításával érhetjük el. Az így létrejött fejlett ipar rendszer technológiai tudás, illetve technológiai és számítástechnikai erőforrás igénye jelentősen nagyobb a korábbinál.

Az I4.0 kompatibilis összetevőkből kialakított rendszerből nyert adatok hosszútávon történő felhasználása lehetőséget ad korábban nem észlelt racionalizálási, illetve ezáltal új fejlesztési potenciálok feltárására, implementálására. Az I4.0 rendszer kialakítása szabványos alapokon nyugszik, mégis igyekezni kell az adott vállalat felépítéséhez, portfóliójához maximálisan hozzáigazítani. Ehhez hatékony segítséget nyújt a Deloitte által meghatározott négy fő fejlesztési irány, amelyeket az alábbi 5. ábra foglal össze [46].



5. ábra Az ipar 4.0 fejlettségi szint kialakításának feltételei [46]

A megvalósításhoz elengedhetetlen a megfelelő szenzor és információtovábbítást biztosító technológiák magas szintű integráltsága az adott gyártórendszerbe. Fontos, hogy az adatgyűjtésnek a teljes folyamatra ki kell terjednie. A raktározás, logisztika, termelést kiegészítő, „third party” folyamatai, operátorok jellemzői (képzettség, tapasztalat, fizikai állapot), minőséget leíró mutatók, tervezett és nem tervezett leállások, illetve a teljes folyamatot érintő erőforrásgazdálkodásra ki kell terjednie az adatgyűjtésnek.

Az így nyert adatok megfelelő tárolását, archiválását, feldolgozását és szabály szerinti hozzáférhetőségét maximálisan biztosítani kell. A manapság elérhető MES szoftverek és a felhő alapú szolgáltatások alkalmazása jó kiindulópont az adatok magas szintű kezelésére. Itt megjegyzendő, hogy sokszor kész szolgáltatást tudunk vásárolni, amelyet bevezetni és használni kell. Szükséges elvárás, hogy a rendszert alkotó gyártóeszközöknek „okosnak” kell lennie. Az ipari automatizálás alap egysége a PLC, amelyből elérhető adatok felhasználhatóak finomprogramozási ERP rendszerben, ezáltal a küldött és fogadott adatok kezelésére.

Ez a fajta integráltság adja a rendszer bonyolultságát, azonban a vállalat elköteleződését követően ez fejlesztési potenciálként jelenik meg. Az IoT használata nagyfokú lehetőséget biztosít az integráltság és hozzáférhetőség növelése érdekében. Figyelembe kell venni, hogy az így kialakuló biztonsági problémák, rések, hozzáférések kérdését is kezelni kell. Manapság hatékony segítséget és sajnos egyre nagyobb kihívást jelent az ML (machine learning, gépi tanulás) széleskörű elterjedése [47].

A gyártóegység így képessé válik a saját munkáját autonóm módon szervezni, döntéseiben a korábban szerzett, archivált és számára hozzáférhető adatokra támaszkodva. Ezt a gépi tanulás (machine learning) képességének nevezzük [48].

2.3.6. A KKV-k és a negyedik ipari forradalom

A Deloitte nemzetközi csoport 2020-ban készített kiadványában elemzi az I4.0 stratégiák bevezetésének hatásait a vállalat különböző területeire nézve [49]. A vizsgálatkor szerzett adatok kiemelik, hogy a vállalat Ipar 4.0 átalakítása, csak elhivatottan és a teljes vállalatot figyelembe véve, a menedzsment utasítására lehetséges. A kinyert adatokat megfelelően feldolgozó vállalatok az üzleti élet számos területén sikereket érnek el, a termékinnovációtól kezdve a munkaerőre tervezésen át a társadalmi hatásokig. A vállalat egészét átfogó hatás kiemelkedő lehetőségeket biztosít a 4. ipari forradalom elveit alkalmazó vállalatok számára.

A korábbi kutatásokkal ezek az eredmények összhangban vannak, miszerint fegyelmezett, előre meghatározott Ipar 4.0 stratégiával kiemelkedő eredményeket érhetnek el a stratégiát mellőző vállalatokhoz képest. Az összehangolt és szigorú stratégiával rendelkező cégek 90%-a tudott minimum 5%-realizálható profitnövekedést elérni, míg a stratégia nélküli cégeknél, illetve a stratégiát csak ad hoc módon alkalmazó cégeknél ezt a szintet csak a vállalatok 72% érte el. Ez kiválóan alátámasztja, hogy a szabványos stratégiák szigorú, de az adott vállalatra nézve testre szabva alkalmazva milyen jelentős potenciállal rendelkeznek az ilyen irányú fejlesztési tevékenységek [49].

Csakúgy, mint a magyar gazdaság elemzésénél, a legnagyobb változatosságot, rugalmasságot Németországban is a KKV-k jelentik. Magyarországon a vállalkozások számának 99,1%-a KKV. A vállalkozási szférában foglalkoztatottak közel kétharmada KKV-nál dolgozik, a működő vállalkozások összteljesítményének 30%-át, a hozzáadott érték 66%-át adták. Németországban ez 37%, a hozzáadott érték 57%-át KKV-k biztosították [50].

Az Ipar 4.0 lehetőséget ad arra, hogy a nagyfokú sztenderdizálás, és az egyes mutatók összehasonlításának segítségével a vállalatok vezetői képet kaphassanak a vállalatuk versenyképességéről akár globális szinten is. Könnyű belátni, hogy ez a gyártórendszerek IT eszköztárának gyors és összehangolt fejlődéshez vezethet.

2.3.7. I 4.0 előnyei a kis és közepes vállalkozások számára:

1. Rugalmasság: Az Ipar 4.0 technológiák lehetővé teszik a kkv-k számára, hogy nagyobb rugalmasságot érjenek el termelési folyamataikban. Ez magában foglalja a termékek tömeges testreszabásának és a változó piaci igényekhez való gyors alkalmazkodásának lehetőségét.

2. Költséghatékonyság: Az IoT és a CPS bevezetése jelentős költségcsökkentést eredményezhet az erőforrás-felhasználás optimalizálásával, a pazarlás csökkentésével és az általános működési hatékonyság javításával.

3. Minőségjavítás: A fejlett technológiák, mint például az előrejelző karbantartás és a valós idejű megfigyelés segítik a magas minőségi szabványok fenntartását azáltal, hogy azonosítják és kezelik a problémákat, mielőtt azok eszkalálódnak.

4. Versenyelőny: Az Ipar 4.0 technológiák átvételével a kkv-k fokozhatják versenyképességüket a piacon. Ez magában foglalja a gyorsabb piacra kerülést, a vevői elégedettség növekedését, valamint az innovatív termékek és szolgáltatások kínálásának lehetőségét.

A kis és közepes vállalkozásoknak szembe kell nézni számos kihívással, amelyeket a korábban említett módon, a menedzsment teljes támogatásával megoldhatnak. Ezekből a legfontosabbak a következők [51]:

1. Pénzügyi korlátok: az új berendezésekhez, szoftverekhez és az alkalmazottak képzéséhez szükséges jelentős pénzügyi befektetés, ami különösen nagy kihívást jelent a kkv-k számára, tekintettel korlátozott pénzügyi és emberi erőforrásaikra.

2. Tudás- és készséghiány: A kkv-k gyakran szembesülnek a legújabb technológiákkal kapcsolatos szakértelem és tudás hiányával, ami hátráltathatja az Ipar 4.0-s megoldások hatékony megvalósítását és hasznosítását.

Az Ipar 4.0 sikeres átvételéhez szakképzett munkaerőre van szükség, amely képes kezelni és fenntartani az új technológiákat, és képzési és fejlesztési programokba kell fektetni, hogy áthidalja ezt a szakadékot.

3. Technológiai tudatosság: Sok kkv nincs teljesen tisztában az Ipar 4.0 technológiák lehetséges előnyeivel és alkalmazásaival. Ez a tudatosság hiánya tétovázáshoz vagy vonakodáshoz vezethet, hogy befektessenek ezekbe a fejlesztésekbe.

4. A megvalósítás összetettsége: Az új technológiák integrálása a meglévő rendszerekbe bonyolult és időigényes lehet. A kkv-k megküzdhetnek az ilyen átalakításokkal járó technikai kihívásokkal és zavarokkal [46].

5. Az infrastruktúra korlátjai: A nem megfelelő IT-infrastruktúra akadályozhatja az Ipar 4.0 technológiák megvalósítását, különösen a feltörekvő országokban, ahol az infrastruktúra fejletlen. Különösen igaz ez olyan területekre, pl agrárium, ahol sokkal szerteágazóbb a gépesítés, illetve különbözőbbek az automatizáltsági szint [52].

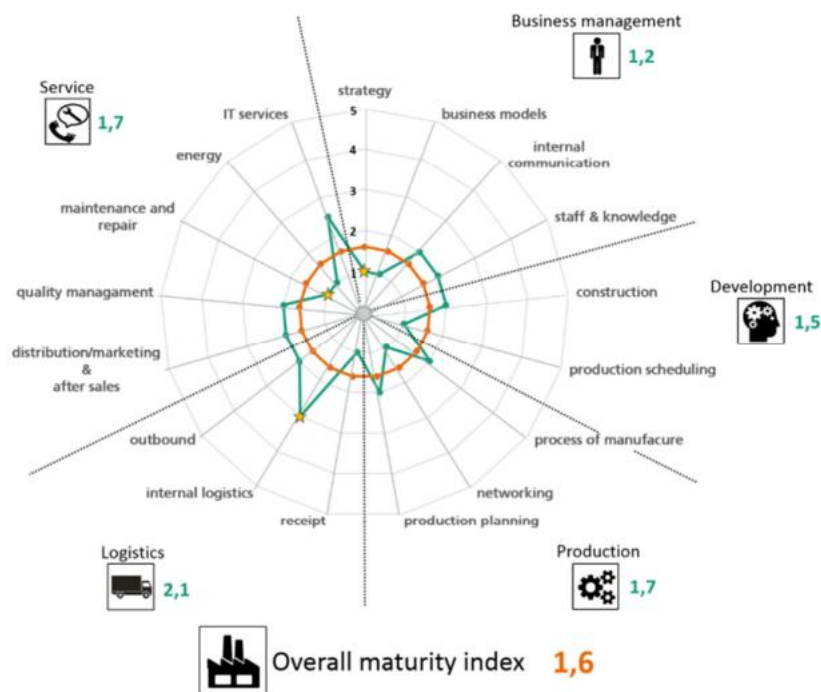
Alfonso Amaral, Paulo Pecas két különálló digitalizációs fejlesztést mutatott be, amelyek célja a kkv-k integrálása az Ipar 4.0-ba [53]. Az első eset egy meglévő folyamat digitalizálással történő racionalizálására összpontosított, egy felhő alapú ingyenes alkalmazás segítségével az információk központosítására, ezek korábban szétszórtaak voltak a különböző részlegek között. Ez a megközelítés javította az osztályok közötti kommunikációt és a hatékonyságot anélkül, hogy megváltoztatta volna a mögöttes folyamatot.

A második eset a gyártási folyamatból való adatok kinyerését jelentette a gyártásvezető táblagépes rendszerének és az üzemi dolgozók QR-kód-szkennereinek bevezetésével. Ez lehetővé tette a valós idejű adatgyűjtést és elemzést, javítva a tervezést és a gyártásellenőrzést. Mindkét eset azt bizonyítja, hogy a digitalizáció viszonylag egyszerű és költséghatékony megoldásokkal megvalósítható, utat biztosítva a kkv-knak az Ipar 4.0 felé történő előrehaladáshoz anélkül, hogy bonyolult vagy költséges technológiákra lenne szükség. Ezek a kezdeményezések a vállalat Ipar 4.0 érettségi szintjének növekedéséhez vezettek, bemutatva a kkv-k lehetőségét, hogy átvegyék a digitális átalakulást, és kihasználják a negyedik ipari forradalom előnyeit [54].

Agostino Villaa és Teresa Taurino bemutatták az Ipar 4.0 kkv-kban történő bevezetésének néhány sikeres példáit. Az egyik eset, amelyet torinói székhellyel rendelkező SME/1-nek hívtak, 70 alkalmazottal rendelkeztek, és egy csúcstechnológiás marógépbe ruháztak be, amely fúró és belső menetvágó funkcióval rendelkezik.

Ez a körülbelül 500'000 euróba kerülő gép CNC-vezérléssel és a gyári felügyeleti rendszerekkel való összekapcsolhatósággal rendelkezik, amely megfelel az Ipar 4.0 elvárásoknak. Ez a beruházás lehetővé tette a kkv számára, hogy automatizálással és integrációval növelje a termelési hatékonyságot. A kkv 24%-os adómegettakarításban részesült a "hiperamortizációs" rendszerben, ami 200'000 eurós nettó befektetési nyereséget eredményezett, így jelentős pénzügyi és működési előnyöket könyvelhetett el [55].

Bár léteznek olyan alkalmazások, amelyek meghatározzák a vállalat Ipar 4.0 érettségét, a meglévő módszerek egyike sem felel meg tökéletesen a kkv-k igényeinek. A „Fraunhofer Gyári Üzemeltetési és Automatizálási Intézetben” végzett tanulmány öt létező modellt értékelt, amelyeket összehasonlítottak abból a szempontból, hogy mennyire felelnek meg a kkv-k azonosított igényeinek költség-haszon elemzés alapján.



6. ábra Radar diagram az érettségi szintek értékeléséhez [56]

Az elemzés eredményei azt mutatták, hogy a meglévő modellek egyike sem felel meg teljes mértékben a kkv-k igényeinek, ami hiányosságot jelez, amelyet pótolni kell. Ezért egy új módszertant fejlesztettek ki, amelyet „Ipar 4.0 Quick Checkup”-nak neveztek, és kifejlesztésének célja, hogy önértékelési eszközt biztosítson a kkv-k számára a fejlesztési lehetőségek azonosítása és az Ipar 4.0 előnyeinek kihasználása érdekében.

A Fraunhofer IFF Industry 4.0 színpadmodellje alapján tervezték; tartalmazott egy kkv-kra szabott képesség-érettségi modellt. A „Quick CheckUp” egy felmérésből áll, amely különböző vállalati és Ipar 4.0 funkcionális egységekre terjedt ki, ezáltal biztosítva az objektív értékelést. Az eredményeket egy radardiagram segítségével jelenítik meg, amely bemutatja a vállalat jelenlegi állapotát és a lehetséges fejlesztési területeket a 6. ábrán látható módon. Ez a továbbfejlesztett módszertan lehetővé teszi a kkv-k számára, hogy függetlenül értékeljék I4.0 integrációjukat, és ennek megfelelően tervezzék meg a stratégiai irányokat, intézkedéseket. Az érettségi szintekkel kapcsolatos elemzés hangsúlyozza az egyes vállalati célok fontosságát, és világosan megjeleníti az érettség értékelését [56]. Az „Industrie 4.0: Innovationen im Zeitalter der Digitalisierung” című könyv a digitalizáció ipari értékteremtésre gyakorolt átalakító hatását tárgyalta, hangsúlyozva a merev értékláncoktól a dinamikus, globálisan összefüggő értékhálózatok felé való elmozdulást [57].

A német kormány 2025-ös csúcstechnológiai stratégiájának részeként. Az Ipar 4.0-ra való átállással kapcsolatban úgy fogalmazott, hogy annak alkalmazása jelentős innovációt és átalakulást jelent az ipari értékteremtésben, rugalmas, dinamikus értékrendszerek felé haladva a globális digitális ökoszisztémákon belül [6]. A tanulmány ismertetett továbbá olyan fontos részeket, mint az

1. „Adatvezérelt modellek”, amelyek a termékközpontúról az adatvezérelt üzleti modellekre való átállásra összpontosítanak, amelyek előnyben részesítik az ügyfelek előnyeit és a megoldás-orientált szolgáltatásokat. Ezzel egyszerre az adatok elérhetősége és hozzáférése kulcsfontosságú sikertényezőkké válnak.
2. A „hibrid értékteremtés”, mint az áruk és szolgáltatások új piaci kínálatba való integrálása, a termékek számos szolgáltatás hordozóivá válnak, az egyedi vásárlói igényekhez igazodva.
3. A „komplexitásmenedzsment”, mivel a műszaki rendszerek és a kapcsolódó termelési rendszerek egyre összetettebbé válnak, interdiszciplináris együttműködést és szisztematikus fejlesztési megközelítéseket igényelnek, mint például az Advanced Systems Engineering (ASE).

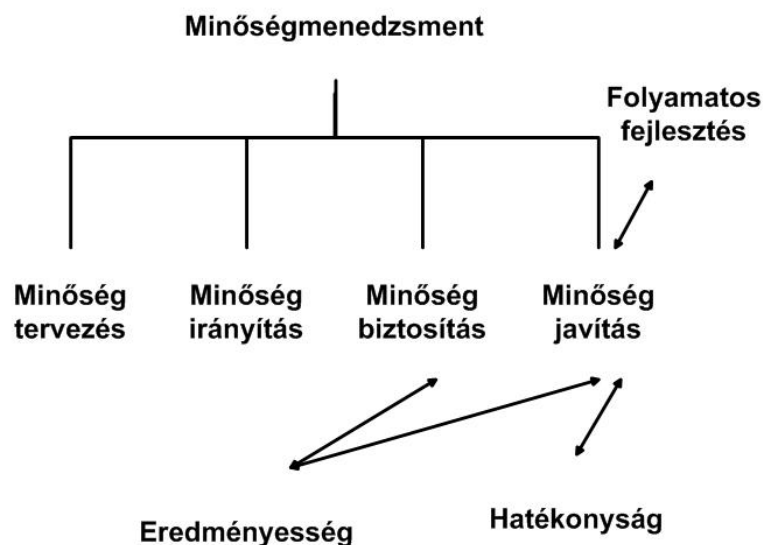
A fejlett párhuzamosnak tekintett technológiák és alkalmazások összekapcsolása a módszer interdiszciplináris teljesítményének bizonyítékai.

Fontos, hogy így nagyobb lehetőséggel bíró területek tárhatóak fel a fenntartható fejlődéshez, mivel könnyebbé teszik az interdiszciplináris kommunikációt és együttműködést [58].

2.4. Minőségmenedzsment a negyedik ipari forradalomban

A globalizáció következtében a vállalkozások közötti verseny jelentősen kiéleződött, ami folyamatos fejlesztéseket követel meg a termékek és szolgáltatások terén. A minőség javítása mellett egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a költségcsökkentési erőfeszítések, és ezáltal a 21. században a hatékonyság is kulcsfontosságú szemponttá vált a termelésben. A piaci viszonyok változásainak követésében a minőségmenedzsment rendszerek jelentős szerepet játszanak [59].

A minőségmenedzsment három szintre osztható: minőségellenőrzés, minőségbiztosítás és minőségszabályozás. Minden társadalmi rendszer szerves része a minőségüggyel való foglalkozás. Az ISO 9000-es szabvány szerint a minőség azt jelenti, hogy egy termék milyen mértékben teljesíti az adott követelményeket. Az 5. ábra jól szemlélteti, hogy a minőségmenedzsment három fő pillére kiegészül egy „negyedik” elemmel, a minőség



7. ábra Minőségmenedzsment koncepció [139]

javításával, amely olyan eredményeket hoz, mint az eredményesség és a hatékonyság. Ezek azonban csak folyamatos fejlesztésekkel érhetők el és tarthatók fenn [60].

A statisztikai folyamatszabályozást (SPC) napjainkban világszerte számos termelő vállalat alkalmazza, mivel kiváló módszer a termékminőség fejlesztésére és a folyamat ingadozásainak mérséklésére. Az SPC alapjait Dr. Walter Shewhart fejlesztette ki az 1920-as években.

A módszer olyan összefüggésekre mutat rá, mint a Deming-féle analitikus vizsgálatok, amelyek a mérési adatok legfontosabb elemei, mivel a folyamatok jobb megértéséhez vezetnek. Az SPC előnyeit a felhasznált adatok minősége határozza meg: minél magasabb az adatok minősége, annál nagyobb előny származik belőlük.

Az SPC alkalmazásakor a szervezet szabályozott folyamatainak fő eleme a statisztikai módszerek megfelelő alkalmazása. Ezek a módszerek számos területen használhatók, például a termékek műszaki tervezéséhez, élettartam előrejelzéshez, minőségi szintek meghatározásához, adatelemzéshez, kockázatelemzéshez és folyamatfejlesztéshez. Az SPC segítségével a vállalatok képesek azonosítani és csökkenteni a folyamatokban rejlő variabilitást, ami hozzájárul a termékek és szolgáltatások minőségének javításához.

Az SPC egyik legfontosabb eszköze a folyamatképeség elemzése, amely lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy meghatározzák, mennyire képesek a folyamatok a specifikációk betartására. A folyamatképeség elemzése során a vállalatok különböző statisztikai mutatókat használnak, mint például a C_p és C_{pk} mutatók, amelyek segítenek meghatározni a folyamatok stabilitását és pontosságát. Az SPC alkalmazása révén a vállalatok képesek folyamatosan monitorozni és javítani a folyamatokat, ami hosszú távon hozzájárul a versenyképességük növeléséhez. A vezetés felelős azért, hogy meghatározza és biztosítsa a kulcsfontosságú statisztikai tulajdonságokat, amelyeket a mérőrendszer alapjaként használnak. Ahhoz, hogy a mérés elfogadható legyen, szükség van a statisztikai tulajdonságok gyakorlati meghatározására és egy megfelelő mérési módszerre. A rövid gyártási felfutási idők nem teszik lehetővé a termékminőség iteratív optimalizálását. A statisztikai folyamatszabályozás egyik fontos jellemzője, hogy hibamegelőző minőségstratégiát alkalmaz. Nagy darabszámban gyártott termékek esetében nem minden egyes munkadarabot vizsgálunk meg, hanem a folyamat vagy a termék statisztikai vizsgálatának eredménye alapján döntünk az esetleges beavatkozásról.

2.4.1. Hibakompensáció

A mérőrendszer pontosságát statisztikai módszerekkel állapíthatjuk meg, amelyekhez az adatokat mérési sorozatok elvégzésével gyűjtjük. Az adatok minőségét a mérőrendszerből stabil körülmények között kinyert eredmények statisztikai tulajdonságai határozzák meg. Az iparban alkalmazott mérőeszközök használatának során egyre fontosabb szempont a minőség és a megbízhatóság. Ezen eszközök használatakor megfelelő körültekintéssel kell eljárni, hiszen egy váratlan meghibásodás is komoly problémákat okozhat.

Például egy hibás mérés következtében rossz minőségű termékek kerülhetnek a piacra, ami nemcsak anyagi veszteséget, hanem a vállalat hírnevének romlását is eredményezheti. A cél az, hogy a mért értékek egy viszonylag szűk tartományon belül helyezkedjenek el. Ha ez a feltétel teljesül, akkor kijelenthető, hogy a rendszerünk stabilan, vagyis megfelelően működik. Azonban, ha nagy szórással rendelkező eredmények keletkeznek, az eltüntetheti a gyártási pontatlanságokat. A viszonylag nagy szórást valamilyen külső hatás, például hőmérsékletingadozás okozhatja, amely negatívan befolyásolja a méréseket.

A szakirodalomban foglalkoznak a CNC megmunkálás és a CMM mérés összekapcsolásával a megmunkálási pontosság növelése érdekében. Go Abe, Masatoshi Aritoshi, Tomoki Tomita és Keiichi Shirashe kutatótársaikkal olyan módszert dolgoztak ki [62], amelyben a megmunkált hullámfelületet az elméleti CAD modellhez hasonlították, majd ez alapján végezték el a hibakompensációt. Ezek a kutatások különösen hasznosak fröccsöntő szerszámok megmunkálása és felújítása esetén. A bemutatott vizsgálatban a maximum $3\mu\text{m}$ hibaértékről $1\mu\text{m}$ -re csökkent a pozicionálási és munkadarab deformációs hibája, míg a megmunkálás pontosságát $30\mu\text{m}$ -ről $10\mu\text{m}$ -re javították. A munkadarab megfogásának fejlesztése és a félkész termék CMM mérőgépen történő mérése, majd ezek alapján a megmunkálási beállítások módosítása jelentősen javította az elérhető pontosságot. Malgorzata Poniatowska és kutatótársai a felvett pontok halmazát statisztikai módszerekkel vizsgálták, majd ez alapján módosították a megmunkáló programot [63]. Az említett példákból jól látható, hogy ez a technológia működőképes, viszont ipari hasznosítása a tömeggyártásban a technológia idő-, eszköz- és személyi igénye miatt nem megoldható [64, 65]. Nagyon fontos, hogy az elvégzendő feladatnak megfelelő eszközt alkalmazzuk. Az indokolatlanul pontos mérés esetén felesleges költségtöbbletet viszünk a folyamatba, míg pontatlan készülék használata esetén fennáll annak a veszélye, hogy a hibás darab elfogadásra kerül. Ezért elengedhetetlen, hogy a mérési folyamat statisztikailag szabályozott legyen. Ez azt jelenti, hogy a rendszer eltéréseit megismételhető körülmények között kizárólag véletlen hibák okozzák. A statisztikai szabályozás lehetővé teszi a mérési folyamatok folyamatos monitorozását és javítását.

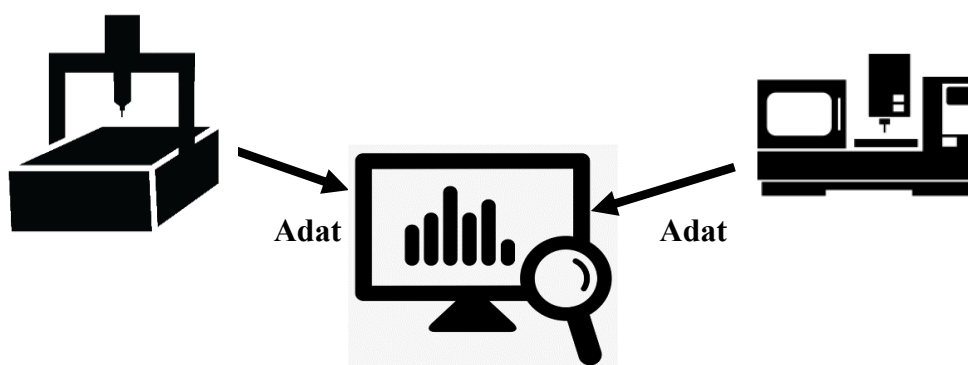
Az említett példákból jól látható, hogy ez a technológia működőképes, viszont ipari hasznosítása a tömeggyártásban a technológia idő-, eszköz- és személyi igénye miatt nem megoldható.

2.4.2. Adatgyűjtés

A gyártástechnológia folyamatos fejlődésével egyre több szenzor jelenik meg a termelési rendszerekben, amelyek segítségével minden szükséges információ összegyűjthető. A modern technológiáknak köszönhetően egyre több és különbözőbb paramétert tudunk mérni és megfelelően tárolni. Azonban ezek az adatok önmagukban még nem használhatók fel hatékonyan; matematikai-statisztikai módszerek, algoritmusok és mesterséges intelligencia segítségével lehet őket megfelelően kiértékelni, elemezni és később tárolni [66].

Érdekes módon ezek az adatok már korábban is rendelkezésre álltak a PLC-ben, de nem használtuk ki őket. Az adatok elemzése során nyert információk felhasználásával a megmunkálási folyamataink alkalmasak további optimalizálásra.

A munkám során az adatgyűjtés a mérőrendszerekből kétféleképpen valósítható meg: manuálisan vagy a MES rendszer segítségével. Ahhoz, hogy egy emberi beavatkozás nélküli adatáramlási folyamatot hozzunk létre, először szükséges az elvi háttérrel biztosítani a folyamat számára.



9. ábra Adatgyűjtés

A rendszerek és a termékek egyre komolyabb hálózati kapcsolatba kerülnek egymással, amelyek kommunikációs szabványok meghatározását igénylik. Erre a szükségletre született meg a gép és gép közötti (M2M) kommunikációs szabvány, az OPC UA, amely teljes mértékben független a programozási nyelvektől és operációs rendszerektől. Az OPC UA lehetővé teszi a különböző gyártási rendszerek és eszközök közötti zökkenőmentes kommunikációt, ami alapvető fontosságú az ipar 4.0 megvalósításához.

A MES rendszer gyártási környezetbe történő implementálásával megnyílik az út az IT alapú gyártás felé.

Napjainkban a MES-alkalmazások nélkülözhetlenné váltak a valós idejű termelésirányítás, valamint az adatgyűjtés és a jelentéstétel támogatásához, ami a termelési teljesítmény javításához szükséges. A MES funkciói a műveletütemezéstől a termelés szervezésén át a logisztika, -egyes esetekben- a munkaerő- és karbantartásmenedzsmentig, a teljesítményelemzésig és a kettő közötti egyéb funkciókig terjednek. A MES rendszerek lehetővé teszik a gyártási folyamatok valós idejű monitorozását és optimalizálását, ami növeli a termelékenységét és csökkenti a költségeket.

A tipikus MES-funkcióknak számos általános modellje létezik, amelyek alapvetően alap- és támogató funkciókra oszthatók. Az alapfunkciók elsősorban a munkautasítások és a gyártási erőforrások tényleges kezelésével foglalkoznak. Ezek közé tartozik a termelési ütemezés, a gyártási folyamatok nyomon követése, a minőségellenőrzés és a készletkezelés. A támogató funkciók pedig a gyártási műveletek támogatási szempontjainak lefedéséhez szükségesek, mint például a karbantartásmenedzsment, a munkaerő-kezelés és a teljesítményelemzés [68].

A MES rendszerek alap- és segédfunkcióit a következő táblázat tartalmazza:

Alapfunkciók	Segédfunkciók
Termelési ütemezés	Karbantartásmenedzsment
Gyártási folyamatok nyomon követése	Munkaerő-kezelés
Minőségellenőrzés	Teljesítményelemzés
Készletkezelés	Jelentéstétel

1. táblázat MES alap- és segédfunkciók

Az alapfunkciók elsősorban a munka utasítások és a gyártási erőforrások tényleges kezelésével foglalkoznak, míg a segédfunkciók a gyártási műveletek támogatási szempontjainak lefedéséhez szükségesek. A MES rendszerek egyéb funkcionális képességei a gyártási műveletek támogatási szempontjainak lefedéséhez szükségesek, és lehetővé teszik a gyártási folyamatok valós idejű monitorozását és optimalizálását.

2.5. Machine Learning a gyártásban

Az ipar 4.0 nem a „sötét gyárak” -ra fókuszál, ami teljes mértékben emberek nélkül működik, hanem egy olyan komfortosabb munkahelyet próbál teremteni, ahol jobb körülmények között dolgozhatunk az új IT megoldások segítségével. Az Ipar 4.0 forradalmi hozzáállása nem csak a termelés adatainak digitalizálásában jelenik meg, hanem abban is, hogy a technikai rendszereket összekapcsoljuk valós időben. [68] Az egyik ilyen megoldás az AI modellek használata. Az AI-on belül a gépi tanulás (Machine Learning - ML) a legelterjedtebb megoldás, mert segítségével az összekapcsolt rendszerek adatait kielemezhetjük, ezzel fejlesztve a folyamatot, csökkentve a gyártásban töltött időt és a költségeket [69]. A folytonosan növekvő számolási és adattárolási kapacitások, és az egyre jobban elterjedő felhőalapú szolgáltatások lehetővé teszik komplexebb algoritmusok elterjedését is [70]. Amilyen szerteágazó az ML területe, pont annyira sokféle területen lehet használni a gyártásban is segédeszközként [71].

A gyártással kapcsolatban a ML-t a felhasználható a következő területeken:

- Prediktív karbantartás
- Minőségmenedzsment
- Tárgyfelismerés és mozgástervezés
- Munkaterület tervezés
- Hibaellenőrzés
- Energiafelhasználás ellenőrzése

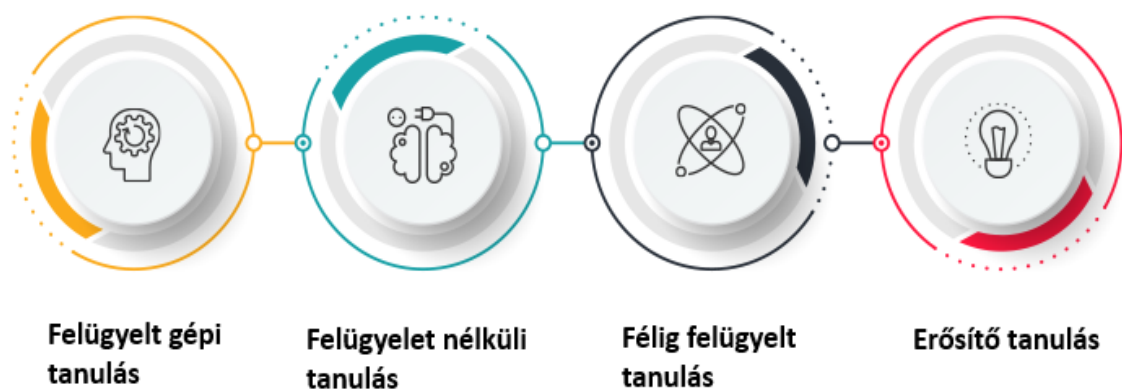
Az ML algoritmusoknak az a nagy előnyük, hogy segítségükkel egy olyan megoldást tudunk készíteni, amely lehet öntanuló, adott gyártmányspecifikus programozási nyelvektől független, így kompatibilitási problémák áthidalhatóak, és a kapott eredmények jobban feldolgozhatóak. A sikeres ML modell a tanulási algoritmus teljesítményén és az adatok különböző tulajdonságain [72].

Az ilyen algoritmusok által biztosított eredmények közvetlenül szolgáltathatnak egy megfelelő rendszeren keresztül adatot akár a döntéshozói szint számára is.

2.5.1. Machine Learning kategóriák

Négy fő gépi tanulási kategóriát különböztetünk meg, ezek a szakirodalom szerint a következők [73]:

- **Felügyelt:** A tanulási folyamat megjelölt (beskatulyázott) adatokkal történik. Ezt az esetet akkor tudjuk a legjobban felhasználni, amikor az adat kategóriájának eldöntése a cél (Például: Hibás-e az adott adatsor vagy nem) – „Supervised: The learning is based on labeled data.”
- **Nem felügyelt:** A tanulási folyamat megjelöletlen adatokon történik. Ezt a legjobban akkor tudjuk felhasználni, amikor egy szám az eredmény (például egy regressziós módszerrel, és kopás-élettartam vizsgálata), vagy ha még nem tudjuk, hogy milyen kategóriák lehetségesek az adathalmazból (Egy nap legyártott termékek minőségét három kategóriába kell sorolnunk, egymástól függően). – „Unsupervised: The learning is based on unlabeled data”.
- **Félig felügyelt:** A tanulási folyamat kombinált adatokkal történik (megjelölt és megjelöletlen). - Semi-supervise: „The learning is based on combined data (labeled + unlabeled)”
- **„Reinforcement/Erősítő tanulás”:** A tanulási folyamat jutalmakon alapul. (Környezetet is figyelembe vevő megközelítés) – „Reinforcement: The learning is based on rewards (environment-driven approach)”



10. ábra A gépi tanulás típusai [74, 75]

2.5.2. Felhőszolgáltatás (Cloud Services)

A mai fejlődő világban egyre több szolgáltató kínál felhőszolgáltatásokat. Erre azért van szükség, mert a folyton fejlődő algoritmusok, matematikai modellek egyre több adatot igényelnek, ezért sokkal nagyobb számítási kapacitásokat igénylenek. A kis és közepes vállalkozások általában nem tudják maguknak megengedni akkora kapacitású eszközök vásárlását és fenntartását, mint ami a ma elérhető szolgáltatók kínálati körében van. Ugyanis ezek a szolgáltatások gazdaságosabb és környezetbarátabb erőforrásokat ajánlanak ezeknek a cégeknek, hiszen a megosztott kihasználás miatti hatékonyság magasabb [76]. A kezdeti biztonsági kérdések mára teljes mértékben megoldódtak. Napjaink talán két legelterjedtebb felhőalapú szolgáltatás kínálója a Microsoft Azure és a Google Cloud Services.

	AWS	Azure	GCP
Bemutakozás	2006	2010	2008
Piaci részesedés	32	23	10
Elérhető	30+	60+	40+
Országok száma	200+	200+	200+
Szolgáltatások sz.	200+	200+	120+

2. táblázat Felhő szolgáltatások [76]

Egy-egy ilyen felhőszolgáltató általában a következő lehetőségeket ajánlja:

- AI alapú szolgáltatások: AI modellek tanítása és futtatása az erősebb hálózati hardveren
- Adatbázisok üzemeltetése: Elérhető adatbázis, amihez így nem szükséges egy saját szervergépet fenntartani, karbantartani, ezekeért a szolgáltató felel.
- Távoli asztal szolgáltatás: Egy sokkal erősebb hardverrel rendelkező virtuális számítógép virtuális asztali hozzáférése, aminek hardver részéért a szolgáltató felel
- Szerveralapú szolgáltatások üzemeltetése, vagy komplett szervergép bérlete: Akár csak egy szervergép szolgáltatásait, vagy egy komplett szervergépet is bérelhetünk, szaktudásunktól függően.
- Tárhely szolgáltatások: Extra tárhely bérlete.

A teljes értékteremtő folyamatot jellemző OEE hatékonysága is jelentősen nőtt a mesterséges intelligenciát használó vállalatoknál [88]. Összességében fejlődő vállalatoknak ezek a megoldások nagyon jó választások lehetnek.

2.6. Ipar 4.0 teljeskörű elméleti megvalósítása

Ahogy korábban már megjegyeztük, az „ipari forradalom” nem csak egy új technológia, erőforrás, műszaki vívmány megjelenéséhez kötődik, hanem annak a társadalomra nézve is komoly szerepének kell lennie. Az ISO 9241-210:2019 Ergonomics of human -system interaction, magyarul a szabványügyi testület kicsit összetettebb nevet adva neki: „Az ember és a rendszer közötti kölcsönhatás ergonómiája. 210. rész: Interaktív rendszerek emberközpontú kialakítása” szabvány egyik fontos összetevője az I4.0 értelmezésnek és felépítésnek. Ahogy a neve is mutatja, az ember és a gép közötti rendszerek kapcsolódási pontjait igyekszik emberközpontúvá alakítani. Jelenleg a műszaki életben kissé háttérbe szorult kutatási irány, viszont nem szabad kihagyni, hiszen az eszközöket emberek használatára tervezzük, még abban az esetben is, ha egy automata gyártósorról beszélhetünk, mert a karbantartást, átszerelést még mindig emberek végzik. Az orvostechikai alkalmazásoknál, pl szív, légzés számítás, természetesen más prioritást élvez ez a terület.

2.6.1. Ipar 4.0 megoldások a gyakorlatban / Smart manufacturing

A kiber fizikai rendszerek a megfelelő tervezés és kivitelezést követően képesek összekapcsolni a virtuális és valódi világot, amelyben intelligens rendszerek kommunikálnak egymással [77]. A fejlett I4.0 világban a termelési rendszerek is kiber fizikai rendszerekké fejlődnek, intelligens raktárrendszerekből, anyagmozgatási eszközökből és gépekből állnak és teljeskörű IT integrációval rendelkeznek. Az intelligens szerszámgépek különböző kiber fizikai rendszerek kombinációjának tekinthetők [78]. Gondoljunk a különböző érzékelőkre, mint fordulatszámérő, gyorsulás helyzet érzékelők, kamerák RFID olvasók, így valós idejű termelési adatokat gyűjthetünk, fókuszálva egy-egy kritikus alkatrészre, illetve folyamatra. Jelentős kihívást jelent továbbá, hogy bár rendelkezésre áll az élő adat továbbítás gondoljunk csak az Ethernet, 4G Bluetooth hálózatokra, azonban mégis az adatok feldolgozása a hatalmas kihívás. A különböző szenzorok, érzékelők, scannerek adatai más és más formátumúak, gyakoriságúak, így nem csak a frekvencia nehezíti a feldolgozást, hanem az adatok minősége és mérete is. Ezen probléma egyik megoldási lehetősége a szabványok bevezetése.

Az MTConnect egy nyílt jogdíjmentes kommunikációs szabvány, amely XML formátumba gyűjti az adatokat a különböző eszközökből, így egy lépéssel közelebb hozza a plug and play megoldásokat [79].

Az Ipar 4.0 jegyében a gyártók ügyelnek arra, hogy eszközei távolról is elérhető legyenek, ha nem is feltétlenül teljeskörűen, hanem hogy az adott gépállapot megjeleníthető legyen. Így könnyedén megjeleníthetők a gépek kezelőfelületei egy távoli irodai számítógépén, vagy akár tableteken vagy egyéb mobil eszközökön. Statisztikai riportok, a gépállapotokról, szerszámállapotokról elérhetőek az ERP vagy adott esetben MES rendszer számára is. Ezek felhőben tárolva könnyen menthetőek és kezelhetőek, elemezhetőek, ezáltal lehetőséget biztosítva, hogy a magasabb döntéshozatali szintek, pontosabb adatok alapján hozhassák meg a döntéseiket. Ezt nevezik vertikális integrációnak. [80] Ezután előrejelzési és állapotkezelési (PHM) algoritmusok segítségével felmérhető az adott kritikus komponensek állapota, így precíz, ezáltal rentábilis, proaktív karbantartás érhető el, és elkerülhető a gép feleslegesen hosszú kiesése a termelésből.

Az egyik jól kiértékelhető terület az energiagazdálkodás. Az adatok informatívak, gyakran további feldolgozást nem kívánnak és jól kimutatható az így nyert adatok hasznossága. A felhasznált energia jól uniformizálható és tervezhető a fogyasztás, gondolhatunk itt egy-egy szerszámgép indulási áramfelvételére, vagy adott gép felfűtésére stb. Fontos, hogy a különböző gépállapotokhoz a megfelelő fizikai körülményeket illesszük, például mikor milyen megmunkálás ment a gépen, milyen anyagon dolgozott, s ezt valós időben figyelhessük meg és megfelelő időjellel tároljuk el [81]. A machine learning eszközei kiválóan alkalmazhatóak ezen egymástól független változók összekapcsolására és kiértékelésére.

2.6.2. Cloud rendszerek és CNC programozás kapcsolata

A mai szerszámgépek CNC vezérlői rendkívül kifinomultak, a HMI-n keresztül minden folyamat kontrollálható és beállítható. Minden szerzsámgép önállóan működik, így létrehozva egy információs elszigetelt rendszer problémát. Erre megoldás a felhőben létrehozott gyártási környezet, amely CPaaS vezérlőegység, mint szolgáltatás áll rendelkezésre [82]. A CPaaS felhasználói nem kizárólag a gépkezelők, hanem a gépek beszállítói, sőt a termék végfelhasználói is lehetnek, annak érdekében, hogy megfeleljenek az új üzleti modellekben felmerülő igényeknek.

Amennyiben a STEP file rendelkezésre áll, akkor az alkatrész gyártási programot generálhatunk a felhőn keresztül. A szerszámpálya generálási folyamat során az offline optimalizálási feladatok, mint például a szerszámok kiválasztásának optimalizálása, a munkalépések és a forgácsolási paraméterek sorba rendezése, adatbázis használata, vagy machine learning megoldások segítségével végezhetők el.

Az interpolációt a felhőben is végrehajtják, így a felhő számítási teljesítménye teljes mértékben ki van használva. Ha nincs adaptív vezérlés, akkor az alapjelek interpolátor általi generálása független a szerszámgép visszacsatoló vezérlésétől [83]. Fontos a HMI megoldás fejlesztésénél, hogy tudjuk, hogy milyen felelősségi köröket szánunk az adott hozzáféréssel rendelkező embernek, aki a gépet beállítja, vagy csak kezeli. Itt megszabhatóak a szerszámgépben nyugtázandó folyamatok. Ekkor az ellenőrzés szerepe olyan dolgokra terjed ki, amelyet program segítségével távolról egyáltalán, vagy csak nehezen oldhatunk meg.

A rendszerünk továbbfejlesztésével eljutunk a kiterjesztett valóság, vagyis az AR használatához [84]. Az AR képes megjeleníteni a megmunkálási folyamatokat. Az AR főbb feladata ebben a környezetben:

- a megmunkálás során gyűjtött valós idejű gyártási adatok megjelenítése
- folyamatok intuitív és hatékony interakciójának kialakítása
- a felhasználók és az intelligens szerszámgépek közötti kapcsolat létrehozása
- statisztikai jelentések a szerszámgépek állapotáról

Ezen gyűjtött adatok közvetlenül elérhetőek a vállalatirányítási rendszerekből, mint például a vállalati erőforrás-tervezés (ERP), ezáltal lehetővé téve zökkenőmentes kommunikációt a terepi szintű gyártóeszközök és a magas szintű döntéshozatali rendszerek között (vertikális integráció).

Az intelligens gépek ütemezése okos gépek, intelligens felügyelet (pl. energiafogyasztás figyelés) és felhőből származó intelligens vezérlőrendszer alapján érhető el. A gépi ütemezés klasszikus probléma, amelyet évtizedek óta tanulmányoznak [85]. Az Ipar 4.0 kompatibilis gépek bizonyos fokú intelligenciával rendelkeznek, és különféle érzékelők és vezeték nélküli kommunikációs eszközök (pl. RFID) segítségével tudnak kommunikálni egymással. Ebben az esetben a gépek nagymértékben transzparenssek abban az értelemben, hogy a gép egyes összetevőinek adatai kényelmesen, valós időben gyűjthetők. Az optimális gépütemezés úgy hajtható végre, hogy hasznos információkat (például működési állapotot és energiafogyasztást) nyerünk ki.

Ezáltal számos akadályt kiküszöböl a gép ütemezésében, mint például a gép meghibásodás miatti megállítása [86], vagy a hosszú távú termelés kiesés. Egy másik fő különbség az Ipar 4.0 gépütemezése és a hagyományos gépütemezés között az, hogy a termékek (vagy alkatrészek) képesek kommunikálni a gépekkel, ami új előnyöket és kihívásokat jelent. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy hordoznak olyan adatsomagot, amellyel azonosíthatóak, így a központi MES rendszer számára láthatóak és mérhetőek a tulajdonságaik.

Az Ipar 4.0 gyártási környezetben minden gép egy kiber fizikai (CPS entitás, amely képes kommunikálni másokkal fizikai és virtuális világban. Ipar 4.0 gépi ütemezésének összetettsége tipikus jellemzője a kiber fizikai rendszerünknek, mint például az autonóm (például öntudat, ön-előrejelzés és ön-összehasonlítás), decentralizált, illetve valós idejű. Ennek eredményeként az Ipar 4.0 gépi ütemezése hatékony, dinamikus és decentralizált ütemezési módszereket igényel [86]. Gyakorlati megvalósítása esetén a legegyszerűbb, ha egy hagyományos gépet szenzorok és megfelelő adatgyűjtők segítségével kiber fizikai rendszerré konvertálunk, fejlesztünk. A mesterséges intelligencia hatékony eszközt biztosít a gépi ütemezéshez az Ipar 4.0 gyárban. Egy elméleti, ideális esetben az Ipar 4.0 gyártási rendszerekben az ütemezési modellek és algoritmusok a CPS kiberterében valósulnak meg (pl. felhő); kölcsönhatásba lépnek a fizikai gépekkel, és együttműködve vezetik a termelést.

3. Módszertan

A 3-5 tengellyel rendelkező szerszámgépek és megfelelően társított mérőgépek a modern gyártás szinte minden területén jelen vannak, az autóipartól kezdve a repülőgépgyártáson át a fogyasztási cikkek és gyógyászati termékek gyártásáig. Az egyénre szabott termékek és a kisebb tételméretek iránti növekvő igény miatt a gépek rugalmassága egyre fontosabbá válik a termelésben. A célgépek helyett a gyártás egyre inkább termelési cellákba szerveződik, amelyek különböző és változó termékekhez igazíthatók.

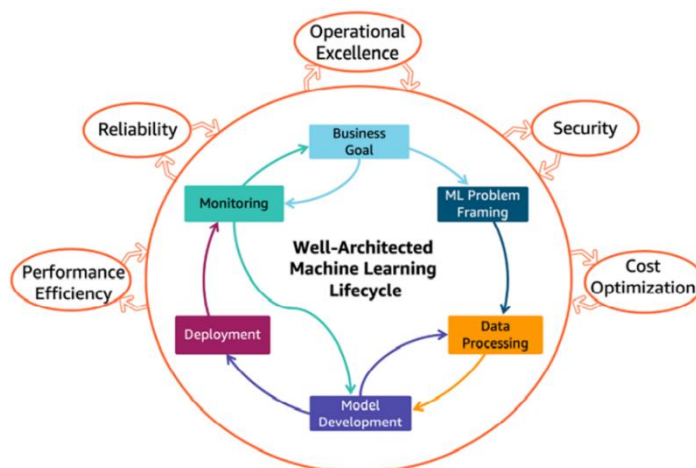
Az alábbi fejezetekben bemutatom a témához kapcsolódóan az alkalmazott módszereket, a hozzájuk kapcsolódó háttérrel, valamint a kutatás során használt eszközöket, azok főbb jellemzőit és működésüket.

3.1. Alkalmazott módszerek bemutatása

Habár egyre jobban terjednek el az AI és ML alapú megoldások, ahol nem egy konkrét képletet adunk meg, hanem a modell kiszámolja adott módszer szerint az összefüggéseket az adatok között. A megoldás típusából adódóan ezek sosem lesznek teljesen 100% biztosak a végső eredményben, de jó minőségű adatokkal ma már nagyon jó eredményeket el lehet érni. Ellenben hogyha van időnk, és jobban megvizsgáljuk az adott problémát, akkor olyan matematikai modellt állíthatunk fel, amiben a helyes összefüggések megadásával mi magunk állítjuk elő a megoldás menetét, így a képlet felparaméterezése után biztosabb eredményt kaphatunk, mint a mesterséges intelligenciát használó megoldások esetében.

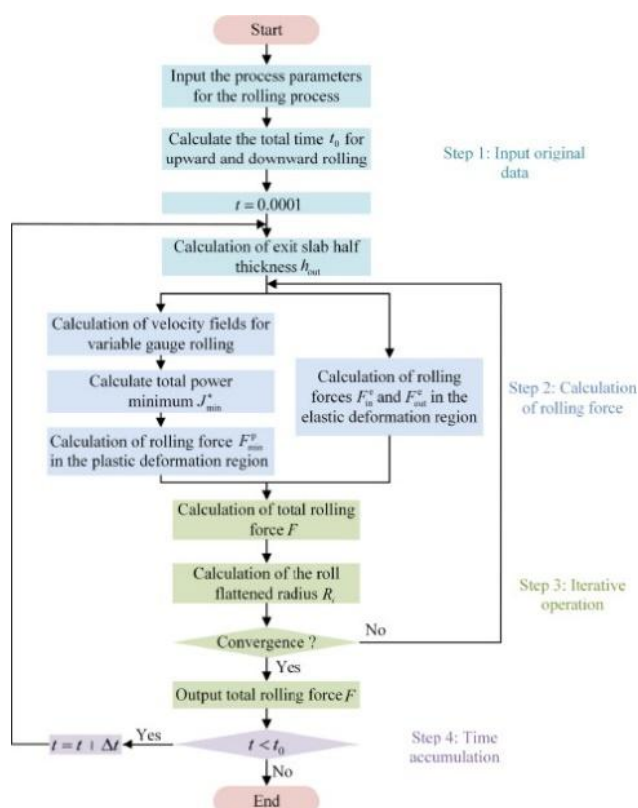
3.2. Korszerű matematikai módszerek

A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás alapú algoritmusok jelentős versenyelőnyt realizálnak, vagyis hatékonyságot növelnek, a költségek csökkentése mellett [88].



11. ábra Gépi tanulás folyamata [87]

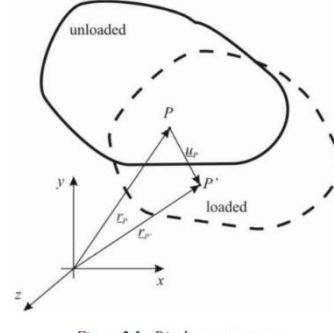
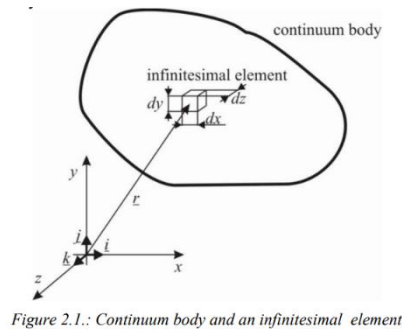
Az egyik jó példa erre az a matematikai modell, amelyet arra hoztak létre, hogy a szabott hengerelt nyersanyagokat (TRB - tailor rolled blank) amikor készítik, a végső lemez paramétereinek megadása után először a szükséges erőt számolhatjuk ki, majd a folyamathoz szükséges teljes időt is [89]. A folyamatot leíró 11. ábra jól mutatja, hogy mennyire fontos az adatok visszavezetése a kalkuláció során.



12. ábra Egy szabott hengerelt nyersanyag számításai mögött álló matematikai modell [89]

3.2.1. Feszültség alakváltozás modell

A testre terhelést működtetve az alakváltozás, elmozdulást eredményez, és az „Eltolási mező” a test összes pontjának eltolási vektorának tekinthető a helyzetvektor függvényében. A test pontjainak elmozdulása irrelevánsan kicsi a test geometriai méreteihez képest. A test deformációja, mint a test pontjainak arányos elmozdulása (egységnyi hossza vonatkoztatva) [97].



13. ábra Terheletlen és terhelt feszültségállapot

$$\underline{u}(\underline{r}) = u(\underline{r})\underline{i} + v(\underline{r})\underline{j} + w(\underline{r})\underline{k} \quad (8)$$

Az alakváltozás a ε vektor hossz gradiense, és a merőleges tengelyek γ szöggradiense. A szögtorzió által reprezentált torzió mindig szimmetrikus. A deformációs vektor egy adott egységvektor elmozdulását írja le. Meghatározása i, j, k egységvektorokkal

$$\underline{a}_x = \varepsilon_x \underline{i} + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \underline{j} + \frac{1}{2} \gamma_{xz} \underline{k}, \quad (8)$$

$$\underline{a}_y = \frac{1}{2} \gamma_{yx} \underline{i} + \varepsilon_y \underline{j} + \frac{1}{2} \gamma_{yz} \underline{k}, \quad (8)$$

$$\underline{a}_z = \frac{1}{2} \gamma_{zx} \underline{i} + \frac{1}{2} \gamma_{zy} \underline{j} + \varepsilon_z \underline{k}, \quad (8)$$

Ahol,

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx}.$$

A test alakváltozási állapota egy adott pontban minden irányra vonatkozó deformációs vektorok összege. Leírható továbbá infinitezimális egységkockával deformációs vektorokkal és deformációs tenzorral.

A deformációs tenzor egy rugalmas test bármely pontjának deformációs állapotát írja le úgy, hogy egy adott irányú deformációs vektort egy tetszőleges irányhoz rendel. Egy adott koordináta-rendszerben három vektorral lehetséges a leírás mátrix vagy kettős formában. A tenzor egy lineáris, homogén vektor-vektor függvény. Leírás lehetséges kettős formával, vagy adott koordináta-rendszerben meghatározott mátrixszal. [97]

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{zy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

A feszültség a test belső felületén megoszló belső erő intenzitása. A feszültségvektor egy dA felület ρ feszültségvektora, amely egy tetszőlegesen választott n irányhoz kapcsolódik, a következőképpen definiálható:

$$\underline{\rho}_n = \frac{d\underline{F}}{dA}.$$

A feszültségvektor normál koordinátáját egy adott felületen normálfeszültségnek nevezzük, és (σ) jelöljük. A felülettel párhuzamos feszültségvektor koordinátáját nyírófeszültségnek nevezzük, és (τ) jelöljük. Az i, j, k egységvektorok által meghatározott feszültségvektorok egy adott felületen.

$$\underline{\rho}_x = \sigma_x \underline{i} + \frac{1}{2}\tau_{xy} \underline{j} + \frac{1}{2}\tau_{xz} \underline{k}, \quad (8)$$

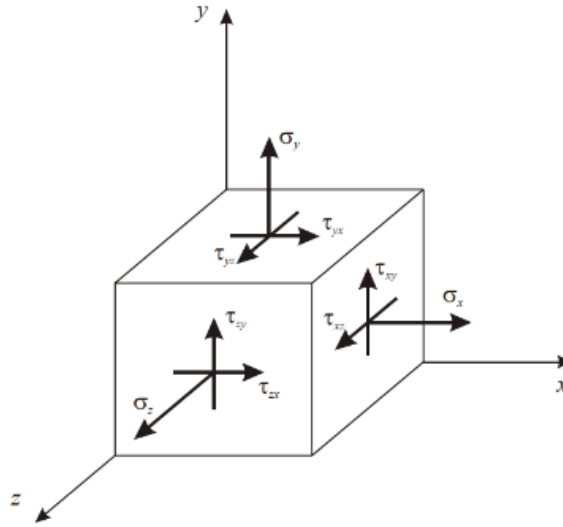
$$\underline{\rho}_y = \frac{1}{2}\tau_{yx} \underline{i} + \sigma_y \underline{j} + \frac{1}{2}\tau_{yz} \underline{k}, \quad (8)$$

$$\underline{\rho}_z = \frac{1}{2}\tau_{zx} \underline{i} + \frac{1}{2}\tau_{zy} \underline{j} + \sigma_z \underline{k}, \quad (8)$$

Ahol,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}.$$

A feszültségállapot az adott pontban ható összes irányú feszültségvektorok összegeként írható le. Lehetséges leírás: infinitezimális egységkockával feszültségvektorokkal, feszültségtenzorral, Mohr-körrel.



14. ábra Feszültségállapot az egységkockában

A feszültségtenzor egy rugalmas test bármely pontjának feszültségállapotát írja le úgy, hogy egy adott irány feszültségvektorát egy tetszőleges irányhoz rendeli. Egy adott koordináta-rendszerben három vektorral lehetséges a leírás mátrix vagy diadikus formában. [97]

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

3.2.2. Folyamatképesség meghatározása

A tényleges és a megfigyelt ingadozás közötti kapcsolat [99]:

$$\sigma_{\text{szórás}}^2 = \sigma_{\text{tényleges}}^2 + \sigma_{\text{mérőrendszer}}^2 \quad (2.2)$$

ahol:

$\sigma_{\text{szórás}}^2$: megfigyelt folyamat eltérés

$\sigma_{\text{tényleges}}^2$: tényleges folyamat eltérés

$\sigma_{\text{mérőrendszer}}^2$: mérőrendszer eltérése

A C_p minőségképességi index meghatározható a következő módon:

$$C_p = \frac{FTH - ATH}{6\sigma} \quad (2.3)$$

Az első egyenletbe behelyettesítve a megfigyelt és a tényleges folyamat indexek közötti kapcsolatot kapjuk meg

$$(C_p)_{\text{szórás}}^{-2} = (C_p)_{\text{tényleges}}^{-2} + (C_p)_{\text{mérőrendszer}}^{-2} \quad (2.4)$$

3.2.3. Átlagos négyzetes hiba gyökének számítása

A távolságok kiszámításához az RMSE (Root Mean Square Error) módszert használjuk. Az RMSE egy statisztikai mérőszám, amely méri, hogy egy modell előrejelzései mennyire térnek el a valós adatoktól. Az RMSE kifejezi az előrejelzés és a valódi értékek közötti átlagos eltérést, és mivel négyzetre emeli az eltéréseket, érzékeny a nagy hibákra [100].

Az RMSE a következő módon számítható:

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

ahol:

y_i : a valódi érték (az igaz adat),

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

n : az adatpontok (minták) száma.

3.3. Alkalmazott statisztikai módszerek

Az eredményeket különböző statisztikai módszerek alkalmazásával értékeltem ki. A szokásos és mindenki számára közérthető átlag, minimum, maximum és szórás használatának bemutatásától dolgozatomban eltekintek. A teljesség igénye miatt azonban a kivonatban szerepeltetem ezen statisztikai eszközök bemutatását is. A dolgozatban az eredmények kiértékelésénél alkalmazott Fischer-féle f próba és t próba kerül az alábbi fejezetben bemutatásra.

3.3.1. Fischer-féle f próba

A Fischer-féle f próbát két variancia nagyságának összehasonlítására szolgál normál eloszlások esetén. A kiinduló feltevés a nullhipotézis, amelynél feltesszük, hogy a két normális eloszlású mintának a szórásnégyzete azonos [101]. Két mérési sorozat szórása azonos átlag mellett is lehet eltérő. Ez különösen igaz, amennyiben azonos mérési darabokról, azonban különböző mérési eljárásokról van szó. Az F próba arra adja meg a választ, hogy ez az eltérés mekkora, vagyis, hogy szignifikáns-e? A vizsgálatot $p=0,05$ vagyis 5% szignifikanciaszint mellett végzik el, amely segítségével a kritikus érték kiválasztható a táblázatból. Az excelben található F.PRÓBA függvény szintaxisa esetünkben két argumentum. A programba beépített f-próba a kétszélű valószínűségét adja meg annak, hogy a szintaxis során megadott „tömb1 és tömb2” szórásnégyzete nem különbözik egymástól szignifikánsan.

A próba végrehajtása:

Vegyünk fel $X_1, \dots, X_n$ és $Y_1, \dots, Y_m$ független minta populációt, adott esetben mérési sorokat. Fontos, hogy normál eloszlással kell rendelkezniük. A két minta populáció várható értékei lehetnek eltérőek, a próba nullhipotézise, hogy a populációk szórásnégyzete, vagyis varianciája egyenlő. Kifejezve képlettel a következőképpen néz ki: $H_0: \sigma^2_X = \sigma^2_Y$.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

és

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i$$

A minták tapasztalati átlagai, és legyenek a minták tapasztalati varianciái:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2$$

Ekkor a próbastatisztikának használandó a következő empirikus érték:

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

F-nek F eloszlása van, de az F statisztikai eloszlása különböző mintanagyságok esetén eltérő. A szabadsági fokok, $n-1$ és $m-1$ adja meg, hogy mikor melyik F eloszlást kell választanunk. Az adott szokásos szignifikanciaszint mellett ki kell keresni $F(n-1, m-1)$ értéket a táblázatból, amelyet kritikus értéknek tekintünk. Amennyiben $F_{emp} \leq F_{krit}$, akkor a nullhipotézis elfogadásra kerül, vagyis a szórásnégyzetek egyenlősége igaz, egyéb esetben nem igaz [102]. Az elemzett varianciaszinteket további próbák alapjaként használhatjuk, például T próba ellenőrzési lépéseként.

3.3.2. T próba

Többféle T próba létezik többféle statisztikai probléma megoldására. A leggyakrabban alkalmazott az egymintás, illetve a kétmintás T próba. Az egymintás T próba azt vizsgálja, hogy egy adott statisztikai mintában egy valószínűségi változó átlaga szignifikánsan különböző egy adott „m” értéktől [102]. A kétmintás T próbával megvizsgálhatjuk, hogy két külön mintában egy egy valószínűségi változó átlagai egymástól szignifikánsan eltérnek-e. A próba lehetőséget ad arra vonatkozóan, hogy két vizsgált eloszlás helyettesíthető-e, azaz azonos, vagy különböző eloszlásból származnak-e. Dolgozatomban a mért értékek jellemzői miatt a kétmintás T próba került alkalmazásra, így ebben a fejezetben azt mutatom be. A T próba alkalmazásakor a következő feltételeknek kell teljesülniük: a vizsgált valószínűségi változók normális eloszlásúak, intervallumban mértek, szórásnégyzeteik megegyeznek, függetlenek.

A próba nullhipotézise, hogy a két vizsgált változó átlaga statisztikai szempontból megegyezik. A kétmintás T próba próbastatisztikája a következő:

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

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.

A próba végrehajtása a következőképpen történik:

Először ellenőrizzük, hogy alkalmazható-e a T próba. Ennek feltétele, hogy az egyes statisztikai mintacsoportok varianciája egyenlő legyen. Ennek elvégzésére leggyakoribb eszköz a Fischer féle F próba. T próba csak akkor alkalmazható, ha az F próba nem mutat ki szignifikáns különbséget a szórások között. A következő a t próbastatisztika kiszámítása. P szignifikanciaszint megválasztása, ez esetünkben 0,05. Kétmintás T próba esetén az f szabadsági fokot az $f=n+m-2$ képlettel kapjuk meg. A p szignifikanciaszinttől függő t_p érték kiválasztása táblázatból történik. Ezt a táblázatot gyakran nevezik Student eloszlás, vagy Student féle eloszlásnak is. A „p” szignifikanciaszint és az „f” szabadsági fok ismeretében megkapjuk a táblázatbeli t_p értéket.

A próba kiértékelése a nullhipotézissel való összevetéssel fejeződik be. Amennyiben $|t| \geq t_p$, akkor a nullhipotézis nem érvényes, alternatív hipotézist tartjuk meg, az eredmény pedig az hogy, két mintában a valószínűségi változók átlagai -adott „p” szignifikanciaszint-mellett szignifikánsan eltérnek, egymástól. Amennyiben $|t| \leq t_p$, akkor a nullhipotézis érvényes, vagyis a kétmintás T próba nem mutat ki szignifikáns különbséget -adott „p” szignifikanciaszint- a két vizsgált statisztikai mintában [102]. Gyakorlati példaként megemlíthetjük, hogy amennyiben érvényes a T próba két különböző mérőeszkővel végzett mérési sorozatra, akkor a két mérési sorozat egymással egyenértékűnek tekinthető.

3.4. Mérőeszköz és eljárások bemutatása

A nagyszámú specifikációval rendelkező, rendkívül összetett műszaki alkatrészek gyártása megköveteli, hogy a vállalatok gyors és hatékony ellenőrzési eszközökkel rendelkezzenek a megfelelőségértékelés elvégzéséhez. Ebben az összefüggésben a metrológia, vagyis a méréstechnika, kulcsfontosságú erőforrás az innovációs és fejlesztési folyamatok, valamint a gyártási folyamatok támogatásában. A metrológia lehetővé teszi a technológiai fejlődés nyomon követését az Ipar 4.0 elveinek megfelelően, és biztosítja, hogy a gyártási folyamatok megfeleljenek a legmagasabb minőségi követelményeknek.

Az alábbi fejezetben a használt mérőeszközöket és mérési eljárásokat mutatom be. Mivel a mikrométer és a tolómérő működése és használata evidens, így azokra külön nem térek ki.

3.4.1. Koordináta méréstechnika

A vállalatok számára elengedhetetlen, hogy a gyártási folyamat megbízhatóságát garantálják, és biztosítsák a műszaki alkatrészek méretbeli és geometriai megfelelőségét. Ehhez egyre kifinomultabb méréstechnikai eszközökre van szükség, amelyek képesek biztosítani a mérési funkciók megfelelő ellátását. A koordináta-mérőgépek (CMM) különösen fontos szerepet játszanak ebben a folyamatban, mivel lehetővé teszik a műszaki alkatrészek gyors és pontos ellenőrzését. Ezek a gépek nagy mennyiségű adat előállítására képesek, ami megkönnyíti a gyártási folyamatokkal való együttműködést és a megfelelőség garantálását [90].

A CMM technológia előnye, hogy lehetővé teszi a műszaki alkatrészek méret- és geometriai előírásainak való megfelelés ellenőrzését. A gépek képesek a legapróbb eltérések és hibák azonosítására is, ami hozzájárul a termékek minőségének javításához és a gyártási folyamatok optimalizálásához. A CMM gépek használata különösen fontos az olyan iparágakban, ahol a precizitás és a megbízhatóság kiemelt jelentőségű, például az autópiparban, a repülőgépgyártásban és az orvostechnikai eszközök gyártásában.

A metrológia és a CMM technológia alkalmazása lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy folyamatosan nyomon kövessék a technológiai fejlődést és alkalmazkodjanak az ipar 4.0 elveihez. Ezáltal a vállalatok képesek lesznek versenyképesek maradni a globális piacon, és biztosítani tudják, hogy termékeik megfeleljenek a legmagasabb minőségi követelményeknek.

A koordináta mérőgép egy több tengellyel rendelkező, univerzális mérőeszköz, amelyet széles körben használnak a modern gyártásban. Általában három tengelyes konstrukcióval rendelkezik, de léteznek öttengelyes változatok is. Minden tengely helyzetérzékelővel van ellátva, és a mérőfej helyzete alapján képes tetszőleges pontokat és a pontokhoz tartozó helyvektorokat felvenni a gép koordináta rendszerében. A mérőgépek leggyakrabban portális kialakításban készülnek, de előfordulnak mozgó asztalos, mozgó állványos vagy mozgó hídszerkezetes változatok is.

A vezetékek típusok közül a légsapágyas a leggyakoribb, mivel előnye, hogy a súrlódásból származó ellenállás mértéke csekély. Emellett görgős típusok is léteznek. A koordináta mérőgép mérőrendszere rendkívül pontos felbontást igényel, ezért nem elegendő a CNC szerszámgépeknél gyakran alkalmazott forgó jeladós módszer használata; helyette mérőlécés útmérésre van szükség. A koordináta mérőgépek mérőrendszerei általában lényegesen pontosabbak, mint a CNC szerszámgépek, ezért rendszerint üveg mérőlécsekkel vannak ellátva.

A légsapágyak működéséhez folyamatos, külső forrásból származó levegőellátás szükséges. Az esetek többségében az üzem légellátását használják, amelynél különös figyelmet kell fordítani a levegő minőségére [91].

A tapintó fej közvetlen kapcsolatban van a munkadarabbal, és többféle kivitelben előfordul. A leggyakoribb a tökéletes gömbformájú tapintó fej, de speciális mérésekhez léteznek különleges kialakítású tapintószárak is, mint például csillag alakú, L alakú stb. Ezek az eszközök többnyire rubinból készülnek, mivel a rubin rendkívül kemény és kopásálló anyag, amely biztosítja a hosszú élettartamot és a pontos méréseket [92].

A koordináta mérőgépek működtetéséhez nélkülözhetetlen a számítógépes vezérlés, amelynek feladata a programtervezés, vezérlés, kapcsolattartás a gép és a felhasználó között, a geometriai elemek illesztése, számítása és az adatok kezelése. A mérőgép szoftvere rendszerint rugalmasan támogatja ezeket a feladatokat, így az adott mérési feladatnak legmegfelelőbb konstrukciót választhatjuk ki. A szoftver lehetővé teszi a mérési eredmények kiértékelését, összehasonlítva a valós és az előírt értékeket, továbbá megfelelő kompatibilitás esetén adatátviteli lehetőséget is biztosít [94].

A tapintó fejek különböző kialakításai lehetővé teszik a mérési feladatok széles skálájának elvégzését. Például a csillag alakú tapintószárak több irányból is képesek mérni, ami különösen hasznos bonyolult geometriájú munkadarabok esetén. Az L alakú tapintószárak pedig lehetővé teszik a nehezen hozzáférhető helyek mérését. A rubin tapintó fejek mellett léteznek más anyagokból készült tapintó fejek is, például kerámiából (SIN) vagy acélból, amelyek különböző alkalmazásokhoz és mérési körülményekhez igazodnak [92].

A számítógépes vezérlés és a mérőgép szoftvere lehetővé teszi a mérési folyamatok automatizálását és optimalizálását. A szoftver segítségével a felhasználók könnyedén létrehozhatnak mérési programokat, amelyek automatikusan végrehajtják a szükséges méréseket és kiértékelik az eredményeket. Ez nemcsak időt takarít meg, hanem növeli a mérési pontosságot és megbízhatóságot is. A szoftver továbbá lehetővé teszi a mérési adatok tárolását és elemzését, ami hozzájárul a gyártási folyamatok folyamatos fejlesztéséhez és optimalizálásához.

Az általam használt Coord3 mérőgépen a TouchDMIS szoftvert alkalmazom, amely lehetővé teszi az intelligens mérési folyamatot. Ez a folyamat a következő lépésekből áll:

Először is, a CAD modellt importáljuk a szoftverbe, amely támogatja az átmeneti formátumokat, mint például a STEP, IGES vagy Parasolid. Ezután a modellt elhelyezzük a koordináta rendszerben, hogy az megfeleljen a valós helyzetnek. A mérési program elkészítése során minden egyes alaksajátosság mérésére saját funkció áll rendelkezésre, amelyek segítségével könnyen elkészíthető a program.

A mérés végrehajtása során lehetőség van grafikus módon is nyomon követni a folyamatot. A mérés befejezése után jegyzőkönyvet készítünk, amelyet a szoftver rugalmasságának köszönhetően többféle formátumban exportálhatunk, például XML, TXT, Excel vagy PDF formátumban. Végül a mérést elmentjük, így később az adott munkadarab újra mérhető, és a program szükség esetén módosítható.

3.4.2. COORD3 Koordináta mérőgép



15. ábra COORD3 Universal 10/7/7 koordináta mérőgép [93]

A mérések a Savaria Műszaki Intézetben található COORD3 Universal 10/7/7 típusú koordináta mérőgépen lettek elvégezve. Ez a mérőgép rendkívül pontos és megbízható eszköz, amelyet széles körben használnak a precíziós mérési feladatokhoz. A mérőgép átadása során átesett a szükséges kalibráción, amit a Renishaw magyarországi képviselője végzett el. A kalibráció során PH10MQ típusú mérőfejet és SP25 típusú tapintó modult használtak, amelyek kiválóan alkalmasak a pontos és megbízható mérések elvégzésére. [93]

A kalibrációs méréseket 9 különböző pozícióban végezték el, 30 és 600 mm közötti mérettartományban. Ez a széles mérettartomány biztosítja, hogy a mérőgép különböző méretű és alakú munkadarabok mérésére is alkalmas legyen. A kalibrációs folyamat teljes mértékben megfelelt a DIN EN ISO 10360-as szabványnak, amely a koordináta mérőgépek pontosságát követelményeit határozza meg. Ez a szabvány biztosítja, hogy a mérőgép megfeleljen a legmagasabb minőségi követelményeknek, és pontos mérési eredményeket nyújtson.

A kalibráció során a mérőgép minden tengelyét és mérőfejét alaposan ellenőrizték, hogy biztosítsák a pontos és megbízható működést. A PH10MQ mérőfej és az SP25 tapintó modul különösen fontos szerepet játszanak a mérési folyamatban, mivel ezek az eszközök biztosítják a mérőgép nagy pontosságát és megbízhatóságát. A PH10MQ mérőfej lehetővé teszi a mérőfej automatikus pozicionálását, ami növeli a mérési folyamat hatékonyságát és pontosságát. Az SP25 tapintó modul pedig kiváló érzékenységgel és pontossággal rendelkezik, ami biztosítja a pontos mérési eredményeket.

A kalibrációs folyamat során a mérőgép minden egyes komponensét alaposan ellenőrizték és beállították, hogy biztosítsák a pontos és megbízható működést. A kalibrációs

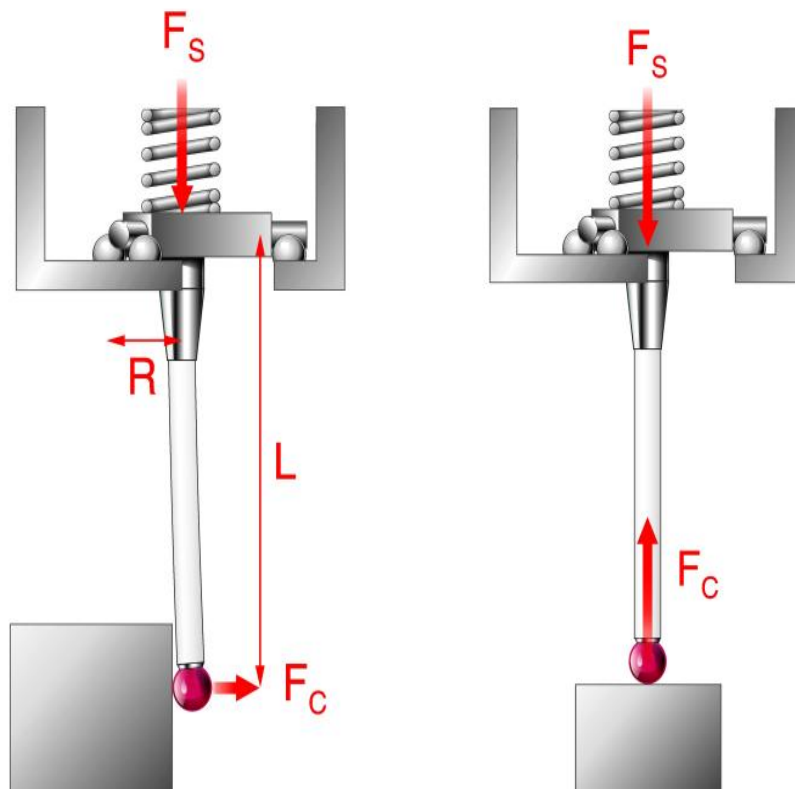
mérések eredményei alapján a mérőgép teljes mértékben megfelelt a DIN EN ISO 10360-as szabvány követelményeinek, ami biztosítja, hogy a mérőgép pontos és megbízható mérési eredményeket nyújtson a különböző mérési feladatok során.

Tapintó szöghelyzet	A=0° B=0°
Gömb átmérő	44,97355 mm
Kalibrált tapintógömb átmérő	3,00414 mm
Maximum hiba	0,54 µm
Minimum hiba	-0,32 µm
Maximálisan megengedett hiba	1,5 µm
Tapintógömb alakhiba	0,86 µm
Mérési bizonytalanság	0,1 µm
Tapintógömb geometriai hiba	-0,6 µm

3. táblázat 2. Táblázat ISO 10360-5:2010 szerinti kalibrációs tanúsítvány eredményei

3.4.3. Mechanikus mérőfejek működése

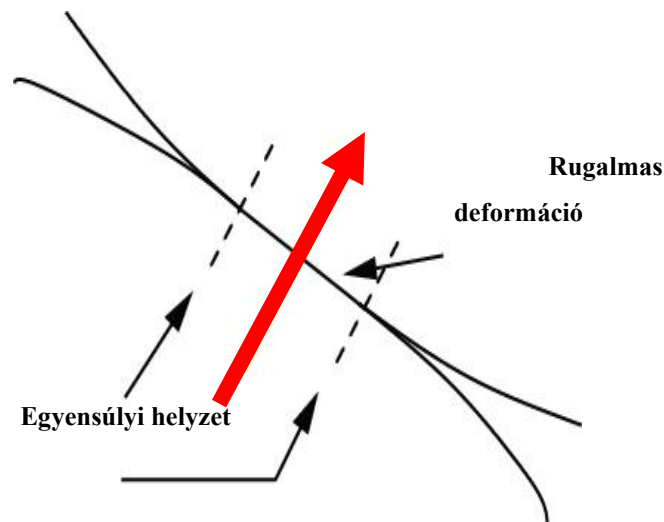
A mérőfejek rendkívül érzékeny és precíz tartozékok, amelyek működési elve a következőképpen írható le: A tapintó a mérések megkezdése előtt „szabad” pozícióban van. Amint elkezdjük megérinteni a mérni kívánt alkatrészt, érintkezési erők lépnek fel. Először a tapintóban található rugó tartja össze a kinematikusan érintkező kontaktokat, amíg a tapintóerő által generált nyomaték megegyezik a rugóerő által létrehozott nyomatékkal. A z irányban történő mérések esetén az erőrendszer leegyszerűsödik, amit sematikusán ábrázol a 12. ábra. Az egyensúlyi pont elérése előtt az erő hatására a nyél kis mértékben elhajlik, ami a rugó merevségéből, a nyél merevségéből és hosszából adódik. Fontos megjegyezni, hogy a nyél a mechanizmus védelme és a kellő merevség miatt általában üreges porcelánból vagy grafitrúdból készül.



$$F_c = F_s \quad (3.2)$$

16. ábra Az egyensúlyi feltételek x,y (balra) és z (jobbra) irányú mérések esetén [93]

A rugók 120° -ként feszítik elő a tapintót. Miután a tapintóerő meghaladja a rugó által indukált nyomatótkot, a kinematikus érintkezők elkezdnek szétválni. Az érintkezőkön keresztüli ellenállás növekedése jelet idéz elő, amely megszakítja a zárt áramkört, mielőtt a felületek elmozdulnának. Végül a gép lehúzódik a mért darabról, ezáltal a tapintó mechanizmus is visszatér a kezdeti pozíciójába [93].



17. ábra A tapintás kinematikai vázlata [93]

A mérőfejek különböző típusai és kialakításai lehetővé teszik a mérési feladatok széles skálájának elvégzését. Például a gömb alakú tapintófejek általánosan használtak, de speciális mérésekhez léteznek csillag alakú, L alakú és más különleges kialakítású tapintószárak is. Ezek az eszközök többnyire rubinból készülnek, mivel a rubin rendkívül kemény és kopásálló anyag, amely biztosítja a hosszú élettartamot és a pontos méréseket.

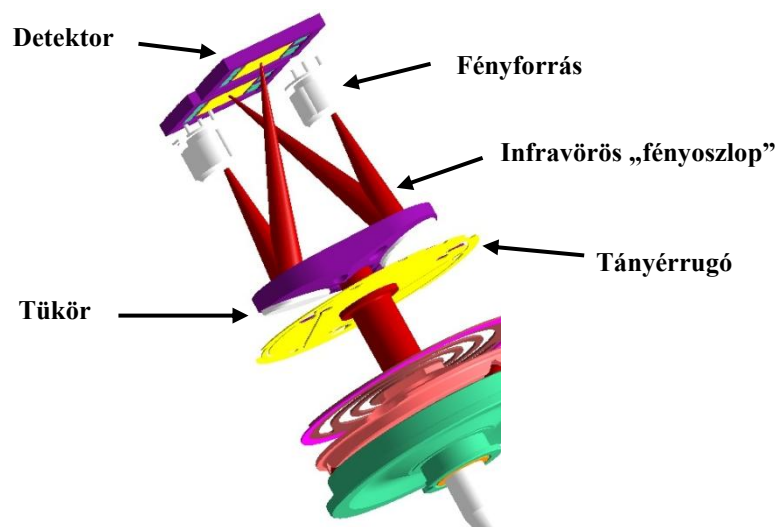
A mérőfejek működése során a tapintófej közvetlen kapcsolatban van a munkadarabbal, és a mérési folyamat során a tapintófej érzékeli az érintkezési erőket. Az érintkezési erők hatására a tapintófej elmozdul, és a mérőrendszer rögzíti a tapintófej helyzetét. A mérési adatok alapján a szoftver kiszámítja a mérési eredményeket, és összehasonlítja azokat az előírt értékekkel. A mérési folyamat során a tapintófej folyamatosan visszatér a kezdeti pozíciójába, biztosítva ezzel a mérési pontosságot és megbízhatóságot.

3.4.4. Szkennelő mérőfejek működése

A mechanikus tapintókkal szemben a szkennelő mérőfejek (más néven szkennelésre is alkalmas tapintó fejek) hatalmas mennyiségű felületi adatot képesek rögzíteni.

Ezáltal részletesebb képet nyújtanak a mérendő tárgy alakjáról, geometriai méreteiről és felületi minőségéről. Ezek a mérőfejek kis tömegű, passzív szerkezeti egységeket tartalmaznak, amelyek magas frekvencián kommunikálnak, így garantálva a nagy sebességű mérést. Az alkalmazott optikai mérőegység közvetlenül érzékeli a tapintószár elhajlását, majd ezen adatok és a gép pozícióadatainak kombinálásával meghatározható a tapintott alakelem helyzete. Fontos, hogy a tapintószár elhajlását mindig a megengedett tartományon belül tartsuk, különben pontatlan eredményeket kapunk [94, 95].

A szkennelő mérőfejek két szenzort is tartalmaznak: az egyik a szkennelésért, a másik pedig a tapintásért felelős. A rendszer rendkívül moduláris, így mindig az optimális megoldás alkalmazható [92].



18. ábra Szkennelő mérőfej felépítése és működése [94]

Az optikai mérőrendszerben a fényforrások (infravörös) és a pozícióérzékelő detektorok közvetlenül a szondatesthez vannak rögzítve, így képesek mérni a mechanizmus teljes kitérését. A fényt két, elmozdulásra és elfordulásra képes tükörré irányítják, amelyek a tapintó oldali mozgó szerkezetre vannak felhelyezve. Ezek a tükrök a felfogott fényfoltokat mozgásra kényszerítik, majd ezek pozícióit felhasználva meghatározható a tapintószár elhajlása. Az elérhető pontosság ebben az esetben $1,5\ \mu\text{m}$, amit az extrém módon merev ($<0,6\ \text{N/m}$) tányérrugónak köszönhetünk. A minimális tapintási erő miatt a szár elhasználódása elhanyagolható [9392].

3.5. CNC megmunkáló központ

A modern gyártóberendezések különböző geometriai mérések elvégzésére is alkalmasak, a felszereltségtől és használati területtől függően. Kiemelkedő jelentőségű a szerszámok geometriai paramétereinek és a munkadarabok geometriai méretének meghatározása, amelyre a megmunkálási folyamat előtt, közben és után egyaránt lehetőség nyílik. Jelen kutatás középpontjában a munkadarab geometriáját vizsgáló, CNC megmunkálógépbe beépített tapintó mérőeszköz áll, amely gyorsabb, sokrétűbb és összetettebb adatgyűjtést tesz lehetővé. Az újdonság abban rejlik, hogy a munkadarabok ellenőrzése – függetlenül az anyaguktól – akár faipari alkalmazások esetén is precízen elvégezhető a megmunkálógépben. Az elkészült darab végső állapotában kerül ki a megmunkálógépből, a mérési adatok akár azonnali rögzítésével, amely adatok többféleképpen felhasználhatóak lehetnek. A mérés lehet a megmunkálóprogram része, így a végleges simító művelet következik a mérés után, illetve lehet a megmunkálás végén, majd ez alapján következik a következő munkadarab megmunkálása. Ez az eljárás nemcsak gyorsabb és költséghatékonyabb, mint a hagyományos eljárások, hanem lehetővé teszi a periodikus mérések alapján nemcsak a munkadarab alapú szerszámkorrekció alkalmazását. Ezentúl a CMM mérések által a mérési ciklus teljesítményének utólagos validálására is lehetőség nyílik.



19. ábra Akira-Seiki V2.5XP vertikális megmunkáló központ

Pozícionálási hiba x irányban	+23,0 μm
	-23,5 μm
Ismétlési hiba x irányban	+3,7 μm
	-5,8 μm
Szisztematikus pozícionálási hiba x irányban	+20,3 μm
	-20,1 μm
Pozícionálási hiba y irányban	+2,9 μm
	-3,7 μm
Ismétlési hiba y irányban	+1,6 μm
	-1,6 μm
Szisztematikus pozícionálási hiba y irányban	1,7 μm
	-2,5 μm
Pozícionálási hiba A tengely	+0,01114°
	-0,01201°
Ismétlési hiba A tengely	+0,00648°
	-0,00355°
Szisztematikus pozícionálási hiba A tengely	+0,00782°
	-0,01026°

4. táblázat Akira-Seiki V2.5XP vertikális megmunkáló központ pontossági adatai

A Savaria Műszaki Intézetben található Akira-Seiki V2.5XP 3+1 tengelyes megmunkológépet használtam, amely Siemens Sinumerik 828 D 4.7 vezérlővel van felszerelve. Ezt a gépet alkalmaztam a gyártási környezetbe integrált mérések és a gyártás végrehajtásához. A gép pozícionálási pontossága a 4. táblázatban található.

A megmunkológép vezeték nélküli, főorsóba rögzíthető munkadarab bemérője a 20. ábrán látható. Ismétlési pontossága 1 μm .



20. ábra OMP 40-2 munkadarab bemérő [92]

3.6. 3D technológiákat támogató mérések integrálhatóságának áttekintése

Ebben a fejezetben a 3D szkennelés, mint egyre inkább fejlődő alkalmazott technológia implementálhatósága kerül bemutatásra. Jelenleg a hagyományos gyártási technológiák dominálnak, de már megfigyelhető az igény, hogy ezeket a gyakorlatokat az adott szervezet egyedi igényeihez és folyamataihoz igazítsák. Emiatt egyre nagyobb jelentőséget kapnak a kísérleti gyártástechnológiák, amelyek célja lehet a technológiai innováció, a költségsökkentés, a termelési sebesség növelése vagy a fenntarthatóság javítása

3.6.1. Bevezetés, kutatási folyamat bemutatása

Erre jó példa a közepes méretű sorozatokban is használható 3D nyomtatás. A kész darabok pontossága azonban kulcsfontosságú a technológia optimális felhasználásához. A pontosságot befolyásolja a nyomtató állapota, kialakítása, környezeti tényezők, a bonyolult szerkezetek alkalmazása, az alapanyag környezeti feltételei, valamint a nyomtató beállításai és paraméterei. A nyomtatott termékek mechanikai tulajdonságaira hatással van a belső kitöltési geometriák alkalmazása, amelyek bizonyos mértékben a méreteket is befolyásolhatják [116]. Ezen kutatási rész a nyomtatott munkadarabok geometriai tulajdonságainak helyes méréséhez és annak vizsgálatához kapcsolódik, kutatva, hogy az eredmények milyen hatást gyakorolnak a különböző körülményekre, például a hőmérsékletre és a szkennelési környezetre. Ez a 3D nyomtatott munkadarab dedikált pontjainak érintéses és érintésmentes mérési módszerekkel történő mérésével történik, figyelembe véve a korábban már említett ISO 230 szabvány ajánlásait [61].

A kísérleti geometria kialakításánál figyelembe vettem a 3D nyomtató jellemző méreteit és a műszaki gyakorlatban leggyakrabban használt formák sajátosságait is. A mérések a Prusa 3D nyomtatóval elkészített munkadarabon történtek. A 3D mérések az intézetben található COORD3 koordináta mérőgépen és a HP 3D Structured Light Scanner Pro S3-on történtek. Az ISO 10360 ipari szabvány alapján a méréseket állandó $21 \pm 1^\circ\text{C}$ hőmérsékleten végeztük.

Az alkalmazott főbb mérési módszerek közé tartoznak a fejlett mérési technológiák, amelyek széles választéka áll rendelkezésre manapság [117].

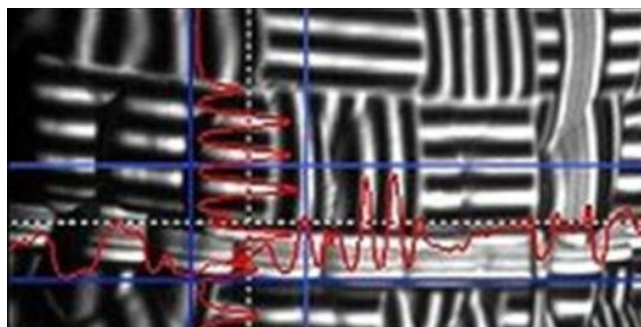
Annak érdekében, hogy a fejlett és összetett mérési eljárásokhoz megfelelő kiindulópontokat biztosítsak, először tolómérős és mikrométeres eljárásokat alkalmaztam.

Ezeknek az eszközöknek a pontosságát a teljes folyamat előtt és után kalibrált mérőeszközökkel ellenőriztem. A mérési folyamat során a 3D nyomtatott munkadarabot X és Y irányban vizsgáltam.

A további vizsgálatokhoz a HP 3D Structured Light Scanner Pro S3 készüléket használtam, amely strukturált fényt alkalmaz a beolvasáshoz, és közepesen nagy munkaterülettel rendelkezik. Ennek hátránya az alacsony mintavételi frekvencia miatti időigényesség, amit a többi 3D mérési módszerhez viszonyított kedvezőbb költsége és mégis megfelelő pontossága kompenzál.

A szkennelés során kétféle mérés lehetséges: vagy CAD modell alapján ellenőrizzük az alkatrész méreteit, vagy a meglévő objektum pontjainak szkennelése alapján készítünk CAD modellt. Esetünkben a munkadarab párhuzamos X és Y felületeit mérőtapintóval mértük, ugyanazon a felületen, mint az előző eljárásoknál tolómérővel és mikrométerrel.

A scannelésnél az a lényeges különbség, hogy egyszerre több pont helyzetét vizsgáljuk. A gyakorlatban ez úgy működik, hogy nem egyetlen pontra fókuszálunk, hanem egy 1 vagy 2 dimenziós alakzatot, például négyzetrácsot vetítünk a mérendő objektumra. A vetített négyzetrács a tárgy felületén torzul, és ebből határozzuk meg a tárgy felületének geometriáját. A módszer előnye, hogy a kamera képén látható teljes felület pásztázható, így akár mozgó tárgyak valós idejű beolvasása is lehetséges. A strukturált fény használatának számos formája létezik, amelyek bonyolultabb számításokat igényelnek. Egyik ilyen lehetőség, ha a vetített vonalak nem fekete-fehérek, hanem színesek. A vonalak színeinek megválasztásakor ügyelni kell arra, hogy a jó megkülönböztethetőség érdekében az egymással érintkező vonalak színárnyalatai a lehető legnagyobb mértékben eltérjenek egymástól. A szkennelési felbontást hátrányosan befolyásolja, ha a tárgy felülete fényes vagy átlátszó. Ilyen esetben a kapott eredmény zajos lehet, és megnő a pontatlanság valószínűsége.



21. ábra Textúrált munkadarab ideális hálózással

A folyamat során először egy 3D felületet szkenneltünk, amely eredményül egy pontfelhőt adott. Ez egy közvetett mérés, amelynek értékeit a további felhasználásnak megfelelő formába kell transzformálni. Először a szkennelt pontfelhők közelítő transzformációval történő feldolgozása történt, amely a Fast Global Registration (FGR) algoritmuson alapul [119]. Ebben az esetben a pontfelhőből mintát kell venni, meg kell határozni a normálértékeit, majd minden pontfelhőhöz tartozó ponthoz Fast Point Feature Histogram (FPFH)) karakterisztikát kell számolni [120].

A Fast Global Registration egy gyors, univerzális 3D geometria regisztrációs algoritmus, amelyet a számítógépes látás és grafika területén használnak. Az ilyen algoritmusok célja, hogy két vagy több 3D pontfelhőt pontosan illesszenek egymáshoz, miközben minimalizálják a számítási időt és a szükséges erőforrásokat. A FGR főként olyan alkalmazásokban használatos, ahol nagy mennyiségű pontfelhő vagy 3D modell adatot kell gyorsan és pontosan egymáshoz illeszteni. Ezek az algoritmusok fontos szerepet játszanak a robotikában, autonóm járművek navigációjában, AR/VR rendszerekben, valamint az orvosi képalkotásban és mérnöki alkalmazásokban [121].

A folyamat a következő lépésekből áll Először előkészítjük a pontfelhőket, amelyek valószínűleg eltérő nézőpontokból vagy érzékelőkből származnak. Az előkészítés során csökkentjük a zajt és javítjuk az adatok minőségét. Ezután kinyerjük a jellemző pontokat vagy normálokat a pontfelhőkből, amelyeket a regisztráció során használunk. Ezek a jellemzők segítenek a két pontfelhő megfelelő illesztésében.

A következő lépésben az algoritmus megkeresi a megfelelő párokat (korrespondenciákat) a két pontfelhő között. Itt az algoritmus megpróbálja megtalálni azokat a pontokat, amelyek az egyik felhőből a másikba illeszkednek. A Fast Global Registration (FGR) algoritmus globális optimalizációs módszert alkalmaz a korrespondenciák alapján, hogy minimalizálja a pontok közötti távolságot a transzformációk (forgatás, eltolás) segítségével.

A rugalmas regisztráció során a FGR lehetővé teszi a pontfelhők közötti nagy eltolódások és különböző irányok kezelését is, ami hasznos lehet, ha a két felhő nem pontosan egybevágó. A globális optimalizáció után finomhangoljuk a regisztrációs folyamatot, hogy a pontfelhők közötti távolság minimálisra csökkenjen, és a regisztrált felhők a lehető legjobban illeszkedjenek egymáshoz.

Végül az algoritmus egy transzformált 3D pontfelhőt ad vissza, amely a két eredeti pontfelhő optimálisan regisztrált verzióját tartalmazza. Ezt a kimenetet használom a további feldolgozáshoz vagy vizualizációhoz.

Ezt követően az Iteratív Closest Point (ICP) módszert alkalmaztuk, amely az egyik leggyakrabban használt pontfelhő illesztési algoritmus. Az ICP algoritmus célja, hogy két 3D pontfelhőt (például egy mérési és egy referencia pontfelhőt) úgy illesszen egymáshoz, hogy minimalizálja a két pontfelhő közötti távolságot. Az algoritmus iteratíván működik, minden lépésben a legközelebbi pontokat párosítja, majd új eltolásokat és elforgatásokat alkalmaz, hogy a pontfelhők a lehető legjobban illeszkedjenek egymáshoz. Az ICP algoritmust 1992-ben Besl és McKay publikálta, és azóta számos javított verzió jelent meg. Elsősorban egy pontosan ismert geometriájú objektum modelljének összehasonlítására használják az abból létrehozott pontfelhővel. A scannelt objektum geometriáját többféle formában tudja feldolgozni, például ponthalmazként, háromszöghálóként vagy parametrikus felületként.

Az algoritmus iterációkon alapul, és minden iteráció két lépésből áll. Először megkeressük a modell felületén a célpontfelhő pontjaihoz legközelebb eső pontokat, majd az így kapott megfelelő pontpárok segítségével megkeressük a legjobb illeszkedést biztosító transzformációt matematikai módszerekkel. Az iteráció addig ismétlődik, amíg el nem éri a kívánt pontosságot vagy az iterációs lépések maximális számát. Annak érdekében, hogy a „párosítás” a lokális optimumokban kevésbé legyen hibás, érdemes előkészítési lépésként a kezdeti transzformációt valamilyen módon megbecsülni. Ilyen előkészítés lehet például a súlypontokat egymásba hozó eltolás alkalmazása, a főkomponens-analízissel meghatározott tengelyek egymásba forgatása, vagy egyszerűen egy véletlenszerű indító transzformáció kiválasztása. Utóbbi esetben érdemes többször is lefuttatni az algoritmust különböző kiinduló transzformációkkal, és a legkisebb hibát okozó eredményt elfogadni.

3.6.2. Az algoritmus bemutatása

Az algoritmus működése a következő lépésekből áll:

Először is, két pontfelhőre van szükség: az egyik a forrás pontfelhő (például egy mérési adat), a másik a cél pontfelhő (például egy referencia modell). Adott egy P adatpont és egy Q modellpont halmaz, ahol a P halmaznak egyeznie kell a Q halmazzal.

A két ponthalmaz tömegközéppontját meg kell határozni, és ki kell számítani azt az elmozdulásvektort, amely a Q modellpontok halmazának tömegközéppontját a P halmaz tömegközéppontjába mozgatja.

Ezután következik a legközelebbi pontok keresése. Az algoritmus minden egyes forráspont számára megkeresi a legközelebbi pontot a célpontfelhőben, gyakran Euklideszi távolságméréseket használva. A Q modellponthalmaz minden pontjához meg kell találni a P halmaz legközelebbi pontját, majd P minden pontjához meg kell találni a Q halmaz hozzá legközelebb eső pontját.

Miután az összes legközelebbi pontot párosították, az algoritmus kiszámítja azt az eltolást és elforgatást, amely a forráspontfelhőt a legjobban illeszti a célpontfelhőhöz. Ezt leggyakrabban rigid transzformációval végzik el, amely forgatásból és transzlációból áll. Az új transzformációt alkalmazva a forráspontfelhőt elmozdítják, hogy közelebb kerüljön a célpontfelhőhöz.

Az algoritmus az előző lépéseket ismétli, folyamatosan finomítva az illeszkedést. Az iterációk addig folytatódnak, amíg a két pontfelhő közötti távolság el nem éri a minimális értéket, vagy el nem éri a maximális iterációs számot. Az ICP algoritmus akkor ér véget, amikor a változások elég kicsik ahhoz, hogy a pontfelhők már ne változzanak jelentősen, vagy ha eléri a megadott iterációs számot.

A távolságok kiszámításához az RMSE (Root Mean Square Error) módszert használjuk. Az RMSE egy statisztikai mérőszám, amely méri, hogy egy modell előrejelzései mennyire térnek el a valós adatoktól. Az RMSE kifejezi az előrejelzés és a valódi értékek közötti átlagos eltérést, és mivel négyzetre emeli az eltéréseket, érzékeny a nagy hibákra.

Az RMSE a következő módon számítható:

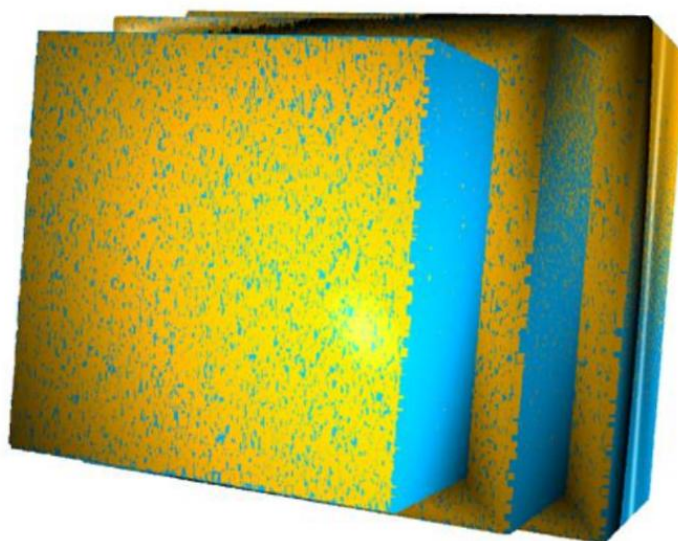
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

ahol:

y_i : a valódi érték (az igaz adat),

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

n : az adatpontok (minták) száma.



22. ábra Munkadarab az iterációkat követően

A 22. ábrán a scannelt munkadarab felülete látható az iterációkat követően. A grafikai ábrázoláson jól látszódik a különböző sűrűségű területek változatossága.

3.7. Machine Learning eszköz alkalmasságának használata

3.7.1. Célkitűzés

A kutatás fő célja, hogy létrehozzunk egy algoritmust, amely jól implementálható egy univerzális, Ipar 4.0 kompatibilis termeléstámogató és vezérlő rendszer elemeként a geometriai mérések kiértékelésével - a későbbi eredmények becslésére. Napjainkban is a hagyományos megmunkálási technológiák, mint marás, esztergálás a legelterjedtebbek. Tanulmányomban a különböző mérési rendszerek eredményeit validáltam; az eredmények alapján a kutatást további mért értékekkel és bejövő adatokkal finomíthatjuk. A PLC-ből elérhető mérési adatok alapján fejlett statisztikai programok segítségével lehetőség nyílik arra, hogy az összegyűjtött adatok mélyebb megértése és felhasználása képes előre jelezni a különböző folyamatparamétereket, mint például a geometriai pontosság, a szerszám élettartama, a karbantartási paraméterek. Ez a tanulmány a marással előállított termékek geometriai méreteire összpontosít egy közepes gyártási sorozat során. A geometriai mérések eredményeinek jobb megértése érdekében a hagyományos varianciaszámítások mellett gépi tanulási statisztikai módszereket is alkalmaznak. A vizsgálatok fő célja az értékek trendjének megfigyelése.

3.7.2. A gyártási, mérési környezet bemutatása

Marási eljárásra többféle megoldás is létezik, de manapság a legszélesebb körben alkalmazottak a 3 és 5 tengelyes gépek. A megmunkálógép PLC vezérléssel rendelkezik, amely különböző típusú értékeket felügyel és koordinál, mint például pozicionálás, hőmérséklet, áram, feszültség stb. Ezeket az értékeket korrekcióra használja a kívánt pontosság és stabil gyártási folyamat biztosítása érdekében. A kutatási irányok napjainkban a folyamatjellemzőkre fókuszálnak, amelyek folyamatosan rendelkezésre állnak a gép adataiból [121, 122]. Ezen adatok kiértékeléséhez a hagyományos statisztikai módszerek nem elegendőek a big data csomagok mérete és jellemzői miatt, elsősorban ez az oka annak, hogy a modern módszerek, mint neurális hálózatok és a mesterséges intelligencia kiértékelési eljárások széles körben elterjedtek. A próbagyártást a korábban már bemutatott AKIRA SEIKI 3 tengelyes CNC marógéppel végeztük.

A program Shopmill ciklusként működött, és egy 18 mm x 18 mm-es téglalap alakú, 32 mm magas munkadarabot készített.

A munkadarab nagyon egyszerű, de pont emiatt könnyen ellenőrizhető a beépített Renishaw OMP40-2 Touch Trigger Probe fejjel, és segít megmutatni, hogy van-e geometriai eltérés és az milyen irányú. Az alapanyag AlMg99, hogy egy tipikus iparban használt munkadarabot reprezentáljon közepes méretű gyártási sorozatként. A program egy szerszámkorrekciós lépést tartalmazott a munkadarab elkészítése során. Ez azt jelenti, hogy a befejező megmunkálási lépés végén a SIEMENS ciklus megmérte a munkadarabot X Y irányban, és ezen értékek alapján korrigálta a szerszám átmérőjét. A simítás és nagyolás között mért értékek a simítás pontosságának javítása érdekében megfelelő értékeket mutatnak, de ebben az esetben a méréseket -mérőgéppel (CMM) is ellenőriztük, csakúgy mint Go Abe és kutatótársai [62]. Esetünkben a neurális hálózatban használt értékek a CNC megmunkálógép speciális Renishaw ciklusából származnak. Ezekkel a ciklusokkal olyan mérések végezhetők el, amelyek a CNC marógép pozicionálási pontosságának megfelelő pontossággal rendelkeznek, és jól használhatók is, mivel a mérések a gyártási helyen és környezetben történnek. Ez azt jelenti, hogy a mérések ugyanazon a rögzítési helyen vannak, nem kell újra befogni és újonnan behelyezni egy másik befogóba, avagy mérőgépbe. További előnyei ennek a lehetőségnek, hogy ez a Renishaw program a gép SIEMENS vezérlésétől teljesen független kalibrációt használ, így ha bármilyen probléma merülne fel a SIEMENS gyártási programmal kapcsolatban, az nem lenne hatással erre a mérésre. Illetve könnyebben feldolgozható adatokat ad, amelyek nagyobb felbontással rendelkeznek. Ezt a Renishaw mérést 11 alkalommal végeztük el X és Y irányban is, 1 mm-es lépésekkel -Z irányban. Ezt követően hőmérséklet mérést végeztem X és Y irányban Calex PC21 MC infravörös hőmérséklet érzékelőkkel két irányból. Minden esetben adott pozícióban, amelyek 3D nyomtatott távtartókkal oldottam meg.

A használt eszközök adatai a következők:

Akira Seiki XP V 2.5, amelyet már korábban is bemutattam a 4. táblázatban.

Bemérő: Renishaw OPM40-2

Irányfüggetlen ismétlési pontosság: 0.001 mm

Hőmérséklet szenzor: PC21MT-0 Calex

Pontosság $\pm 1\%$ olvasási $\pm 1^\circ\text{C}$ amelyik nagyobb

Ismételhetőség $\pm 0.5\%$ olvasási vagy $\pm 0.5^\circ\text{C}$ amelyik nagyobb

A próbagyártás 10 db munkadarab volt a korábban bemutatott folyamat szerint. Minden munkadarabhoz készült 11x2 mérés X és Y irányban, illetve a független hőmérsékletmérés, amely mint független változó elengedhetetlen a neurális hálózatok felépítéshez [123]. A gyakorlati tapasztalatok és elérhető adatok alapján EXCEL ciklus segítségével megbecsültem a geometriai mérési értékeket a további (90 db) ciklusokhoz. Ez azért volt különösen fontos, mert a matematikai módszer ellenőrzése volt a kísérleti sorozat fő célja és nem a szerszámgép megbízhatósága.

3.8. Szerszámgép ballbar méréseinek kiterjesztett feldolgozása

Különböző mérési eljárások állnak rendelkezésre a munkadarab pontosságának biztosítására és folyamatos nyomon követésére. A leggyakrabban használt módszerek közé tartozik a szerszámbemérő és a munkadarab mérőtapintóval végzett eljárása, amelyek a szerszám vagy a munkadarab felületének érintésével működnek. Az összegyűjtött mérési adatok elmenthetők a gép memóriájába, vagy továbbíthatók egy központi adatbázisba további elemzés céljából. A tanulmány a Renishaw által kifejlesztett ballbar-ra fókuszál, amely egy széles körben és hatékonyan alkalmazott eszköz a szerszámgépek pontosságának ellenőrzésére [133].

3.8.1. Ballbar mérés alkalmazásának bemutatása

A ballbar mérési eljárás modern, felhasználóbarát és gyors módja egy szerszámgép pontosságának ellenőrzésére. A ballbar egy teleszkópos lineáris érzékelőből, illetve mindkét végén egy-egy precíziós gömbből áll. A mérés során az érzékelő végeit mágneses csészék segítségével precízen rögzítik, ami +/- mikrométer pontosságú sugar irányú pontossági eredményeket ad a körpálya minden egyes pontjában. A CNC gépek pontosságát számos hiba befolyásolhatja, például hibás lineáris megvezetés, kopott főorsó vagy a munkadarab rögzítésével kapcsolatos problémák [129]. A gépekhez köthető hibák lehetnek geometriai, holtjátékhoz kapcsolódó vagy dinamikai jellegűek. Ezek a problémák előfordulhatnak használt, új, vagy akár nem megfelelően telepített gépek esetén is.

Ezt az eljárást általában előre meghatározott időközönként, nagyszabású beavatkozás (például egy fő gépelem cseréje) illetve ütközés után hajtják végre. Manapság a kis- és középvállalkozások különféle CNC marógépeket használnak.

Ez azt jelenti, hogy a gyártási sorozatok méretétől függően a termelés gyakran inkább egyedi gyártásra, mint sorozatgyártásra hasonlít. Ilyen esetekben a helyes beállítás és a gép teljesítményének átfogó áttekintése egyre fontosabbá válik a selejt csökkentése és a hibamentes gyártás elérése érdekében [130].

Példaként említhető a Bosch vállalat, amely az Ipar 4.0 megfelelő megvalósításával csökkentette költségeit és veszteségeit. Az adatvezérelt folyamatok optimalizálják a modern gyártási és karbantartási folyamatokat [131]. Az Ipar 4.0 alkalmazások fontos hatása, hogy optimalizáció és alacsonyabb energiafogyasztás révén kisebb környezeti terhelést érhetnek el [132].

A körinterpolációs mérést a DIN EN ISO 230-4 szabvány alapján végzik el. A 4. táblázat Akira-Seiki V2.5XP vertikális megmunkáló központ pontossági adatait tartalmazza. A körinterpolációk pontosságának méréséhez Ballbar-mérést kellett végrehajtani. A Ballbar érzékelő felbontása 0,0001 mm, és a 150 mm-es sugár mérés során 0,00115 mm pontosságot ér el. Ezen értékek alapján, a szimuláció után, három különböző klaszterméretet határoztam meg, amelyek 0,001 mm, 0,003 mm és 0,005 mm tartományba esnek.

3.8.2. A Ballbar mérés végrehajtása

A Ballbar-mérés során egy lineáris érzékelőt használnak, amely két tökéletesen megmunkált gömbhöz kapcsolódik. Ezeket mágnessel rögzítik a gépasztalhoz és a főorsóhoz. A tesztet mind az óramutató járásával megegyező, mind azzal ellentétes irányban el kell végezni, mindkét irányban 360 fokos mozgást igényelve, plusz további 180 fokot (végszög és túlfutás). Ez biztosítja a gép pontosságának átfogó értékelését [133].

A tesztet a DIN EN ISO 230-4 szabvány előírásainak megfelelően kell elvégezni. Fontos megjegyezni, hogy a teszt során mért pontosság eltérhet a tényleges megmunkálási műveletek során elért pontosságtól, mivel ez a teszt kizárólag a gép mozgásának pontosságát méri.

Az Ipar 4.0 környezetében a metrológia jelentősége növekszik, mivel az értékek különböző célokra hasznosíthatók: riportálásra, optimalizálásra és vezérlésre, kalibrációs eredmények összehasonlításával [134].

A teszt után kapott jegyzőkönyv az alábbi értékeket tartalmazza (az egyes pontoknál mért értékeken túl):

HEADER:
File type: RTB
Owner: Ballbar
Version no: 20.0

MACHINE::
Machine: SIMULATOR
Date: 06:32 6-OCT-2024
By: SIMULATE v20.0
Length: 150.0000
Plane: XY
Radius: 150.0000

Feedrate: 254.0000
Data Start: 0.000000
Data End: 360.000000
Ang over: 180.000000
Stat/Dyn: D
Dir: A
Cal Len: U
Run Count: 2
Serial Number: G*****
Gauge Exp. Coeff.: 0.000000
Machine Exp. Coeff.: 0.000000
Max Targets: 360

A jegyzőkönyv tartalmazza azon gép főbb tulajdonságait, amelyen a tesztet végezték, beleértve az alapadatokat, mint a dátum, az előtolási sebesség, a Ballbar hosszúsága, a sík és a teszt felbontása. Ez az információ megmutatja, hogy a körmozgás során hány pontot rögzítettek.

Gyakorlatilag használhatunk egy 360 pontos verziót, de amennyiben jobb felbontásra van szükség, beállíthatjuk 500 pontra is. Bár a pontok mindenképpen bekerülnek a jegyzőkönyvbe, 360 vagy 500 különböző pont kezelése rendkívüli kihívást jelenthet. Különösen igaz, ha korábban még a .txt fájl sem áll rendelkezésre, csak a nyomtatott jegyzőkönyv. E probléma megoldására kifejlesztettünk egy megoldást, amely lehetővé teszi a pontok .txt formátumból történő Excel-táblázatba való betöltését. Ez az eljárás jelentősen leegyszerűsíti az adatok kezelését és elemzését. A szimulációhoz a Renishaw Ballbar 20 szoftvert használtuk, amely „advanced” üzemmódban képes minden mérhető hibával és eltéréssel dolgozni.

A Renishaw Ballbar 20 szoftver átfogó eszközt biztosít a szerszámgépek pontosságának elemzésére. Lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy különböző változókat válasszanak a fő tesztrészekhez, például geometriai hibák, holtjáték-eltérések és dinamikai hibák elemzésére.

A kezdőképernyőn a felhasználók egy tökéletes kört láthatnak, amelyen kék és piros nyilak jelzik a Ballbar mozgásának irányát. Ez a vizuális ábrázolás pontosan tükrözi a valós méréseket.

A körinterpolációval mérhető hibák közé tartozik az X vagy Y tengely holtjátéka, az irányváltási hibák az X vagy Y tengelyen, a forgási hibák, a spirális hibák, a derékszög-hibák, a szervoillesztési hibák, a skálázási eltérések és az Y-tengely egyenességi hibái az X-tengelyen. A szoftver részletes elemzést és vizualizációt tesz lehetővé ezekről a hibákról.

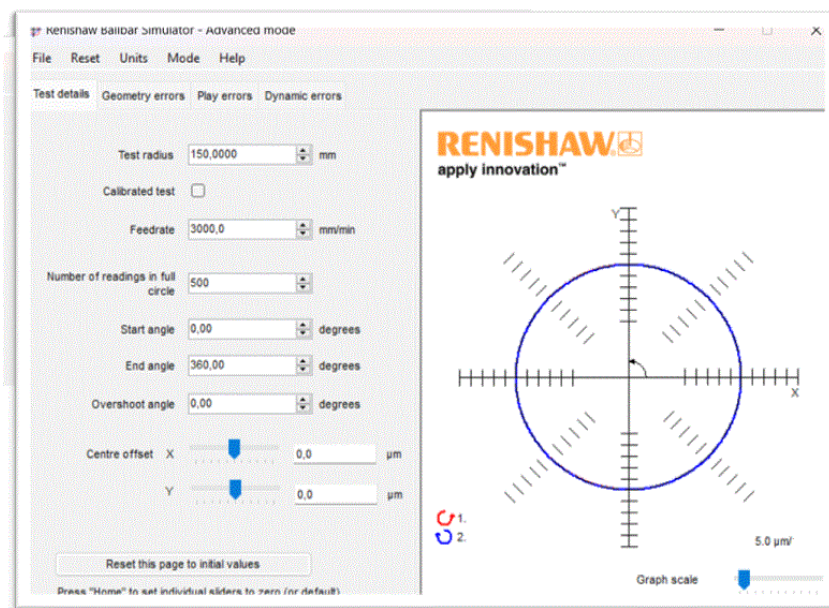
3.8.3. A mérés kiértékelésének fejlesztése

Az adatok további feldolgozásához kifejlesztettünk egy programot a széles körben használt .Net környezetben, C# programozási nyelvvel és Windows-form elemekkel. A program elemzi a jelentés fájljából származó adatokat, és tartalmaz egy funkciót, amely hibaüzenetet jelenít meg, ha a fájl sérült vagy olvashatatlan. A felhasználói felület lehetővé teszi a klaszterméretek kiválasztását a gép szabványos vagy korábban meghatározott pontossága, valamint a Ballbar-mérési eljárás pontossága alapján.

A program előzetes számításokat végez, és kiindulási értékeket kínál a felhasználónak a kiválasztott klaszterszám alapján. Kiszámítja a fájlból származó minimum- és maximumértékek közötti különbséget, és ennek megfelelően hoz létre klasztertartományokat. A program ezután az összes értéket klaszterekbe helyezi, és megszámlolja az egyes klaszterek értékeit.

Kontrollfájlt hoz létre az egész adatállomány és az egyes klaszterek minimum- és maximumértékeinek tárolására.

Ezenkívül a program trigonometriai függvények alapján képes poláris koordináták meghatározására. Ez a funkció lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy az adatokat poláris koordinátákból Descartes-koordinátákká alakítsák át, megkönnyítve ezzel azok értelmezését és további elemzésekhez vagy karbantartáshoz való felhasználását.



23. ábra Ballbar szoftver kezdőképernyője

Itt a felhasználó különböző változókat választhat a fő tesztészletekhez, például radiusz, előtolás, geometriai hibákat, holtjáték hibákat és dinamikai hibákat.

Különböző előtolási értékek állíthatók be, és a szakirodalom alapján $4000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ alatti különböző előtolási sebességek között nincs jelentős eltérés. Az értékek kiválaszthatók úgy, hogy egy valós gép hibáit reprezentálják. Ezek a hibák változóak lehetnek, kezdve az egyszerű holtjáték hibáktól a gépek egyenességi hibáin át. Ez 100%-ban tükrözi a valós méréseket.

A körinterpolációval mérhető hibák a következők [136, 138]:

- Holtjáték az X vagy Y tengelyen
- Irányváltási tüskék (késések) az X vagy Y tengelyen
- Rotációs hiba
- Spirális hiba
- Négyszögesség hiba
- Szervo hiba
- Négyszögesség és szervo hiba
- Skálázási hiba
- Négyszögesség és skálázási eltérés
- Egyenetlen holtjáték az X vagy Y tengelyen
- Háromágú görbeség
- Y-tengely egyenesség az X-tengelyen
- X-tengely egyenesség az Y-tengelyen
- Egyenesség-hiba
- Ciklikus hiba az X vagy Y tengelyen
- Görbék középpontja eltérő helyen
- Különböző átmérőjű görbék
- „Akadva csúszás” az Y tengelyen
- Egyéb szokatlan alakzatok

4. Eredmények bemutatása, elvégzett vizsgálatok

4.1. Gépsatuban létrejövő deformáció vizsgálata

Az alábbi fejezetben a gyártást megelőző lépés, a megfogás kerül fókuszba, hiszen az adatok már itt rendelkezésre állnak a folyamatbiztonság vizsgálatához.

A gyártás megkezdése előtt már foglalkoznunk kell a munkadarab megfogás során létrejövő deformációkkal, hiszen jelentős hatása lehet a kész munkadarabra. Forgácsoló megmunkálás körülményeinek a vizsgálata során a gépsatuba történő befogáskor keletkező deformációk ritkán vagy egyáltalán nem kerülnek a fókuszba. A megmunkálás pontosságára azonban a befogás jelentős hatással van, hiszen ez általában egy gépkezelőtől függő változó. Ugyanakkor a szükséges nyomatékknak megfogáskor egy meghatározott és elérhető adatnak kell lennie.

4.1.1. Bevezetés és célkitűzés

A munkadarab gépsatuba történő megfogásakor végrehajtott mérések során figyelembe kell venni a munkadarab deformációja mellett a satupofák helyzetváltozását is. Egyszerű geometriák esetén a deformációk kiválóan modellezhetők szimulációs szoftverek segítségével. A szimulált, illetve méréssel alátámasztott értékek megfelelő adatbázisba történő feltöltésével létrehozható egy adatbázis, amely az egyes geometriákhoz, anyagtípusokhoz és a számolt megmunkálási erőkhez társít javasolt meghúzási nyomaték értékeket.

A megfogó olyan tartóeszköz, amelyet a munkadarab megtámasztására és pozicionálására használnak a gyártási folyamat során, a marószerszámhoz vagy mérőműszerhez, illetve egy másik munkadarabhoz képest pontos helyen és irányban van [103]. Mivel a rögzítés fontos szerepet játszik a gyártási folyamatokban, ezért kihatással van a gyártás magas minőségére és hatékonyságára.

A munkadarabok gépsatu általi rögzítése rugalmas deformációt okoz a munkadarabon, ha a szorítóerő irányában kicsi a merevség. Mivel ez egy külpontos nyomás, ezért az alkatrész felfelé domborúvá válik. A probléma a megmunkálás után jelentkezik, a szorítóerők feloldása után, ekkor az anyagban megszűnnek a belső feszültségek és a rugalmas deformáció megszűnik.

A megmunkált síkfelület ezért a szorítóerő megszűnte után homorú lesz, ami geometriai hibát eredményez [104]. A munkadarab deformációja elkerülhető vagy minimalizálható megfelelő befogási módszerekkel és paraméterekkel, mint például az ütközők és gyorszorítók számának és helyének beállításával, valamint az ideális megmunkálási és szorító erők alkalmazásával [105]. Ha ezek a pontatlanságok meghaladják az előre meghatározott tűréshatárokat, akkor a darab nem tudja betölteni a tervezett funkcióját (pl. tömítés) [106].

4.1.2. Az analitikai paraméterek kiszámítása

A megmunkálási és befogási erők számíthatók, hogy meghatározzák azokat az ideális erőket, amelyek a megengedett érték alatt tartja a deformációt. A megmunkálási erőt sok tényező befolyásolja, pl. a forgácsolási sebesség, az előtolás és a fogásmélység, a szerszám keménysége és a megmunkált anyag felületi tulajdonsága, a szerszám és a munkadarab geometriája, a megmunkálási stratégia stb. [107].

Asante kutatómunkája során a rögzítés megfelelőségének és a forgácsolási paramétereknek a munkadarab deformációjára gyakorolt hatását vizsgálta. Az értékelés során felmérték a rögzítőelem merevségi mátrixának minimális sajátértékét, amely minimális elmozdulásokat jelent az érintkezési pontoknál, és a stabilitás mérése érdekében a forgácsolóerők által kiváltott legnagyobb munkadarab elmozdulást. [108]

A satu a szorítóerőt a trapézmenettel biztosítja, amely ebben az esetben TR24x5 menetemelkedésű volt. A trapézmenet teljes terhelési nyomatékának számításait az (1)–(6) egyenletek mutatják, ahol: α , vezetési szög [°], p' , súrlódási szög [°], β , menetszög [°], p , menetemelkedés [mm], d_1 , névleges átmérő [mm], d_2 , emelkedési átmérő [mm], μ' , effektív súrlódási együttható [-], F_0 , kifejtett erő [N], T , teljes nyomaték [Nmm], T_m , erő kifejtésével létrehozott nyomaték [Nmm], T_a , a súrlódási erők miatti nyomaték [Nmm].

$$\alpha = \arctg\left(\frac{p}{d_2 \cdot \pi}\right) = \arctg\left(\frac{5}{21.4 \cdot \pi}\right) = 4.2533^\circ \quad (1)$$

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{0.13}{\cos\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0.1035 [1] \quad (2)$$

$$p' = \arctg(\mu') = \arctg(0.1035) = 5.9106^\circ \quad (3)$$

$$T_m = F_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tg(\alpha + p') \quad (4)$$

$$T_a = F_o \cdot \mu \cdot \frac{d_a}{2} \quad (5)$$

$$T = T_a + T_m \quad (6)$$

4.1.3. Szimulációval történő megoldás

A G Qin, Z Wu és W Zhang által közzétett irodalomban bemutatásra került egy módszer, amelyet a teljes maradékenergia minimalizálásának koncepciójára fejlesztettek ki. Az érintkezési erők és a munkadarab deformációja közötti kölcsönhatás elemzésére végelelemes módszerrel végzett szimulációkat alkalmaztunk. A tanulmány kimutatta, hogy olyan tényezők, mint a szorítóerő nagysága, az alkalmazás helye és a meghúzási sorrend jelentős hatással vannak a munkadarab deformációjára [109]. Branko Tadic és csapata egy vizsgálatot mutatott be, ahol a szorítóerők hatásaival kapcsolatosan rengeteg korábbi ismeretet vettek figyelembe [110]. Kúpokot mértek, és megállapították, hogy a valós mérések és a FEM modell különbségei torzultak a súrlódási erők hatására, de esetünkben a munkadarab nyomatékterhelése nagyobb volt, mint ebben a vizsgálatban. Esetünkben 0,14-es súrlódási tényezőt használtunk az anyagmodellnél az Ansys szimulációban.

Az Ansys-ben lineáris anyag modell lett létrehozva, mivel a befogás miatti deformáció csak a rugalmas tartományban hat és a következő anyagtulajdonságokat használtam: 2770 [kg/m³] sűrűség, Young-modulus 70 [GPa] és Poisson-féle arány 0,33, az „AlMgSi1” alumíniumötvözet átlagértékei szerint. Az alumíniumot a megmunkálhatósága miatt széles körben használják az iparban és a CNC megmunkálásban. Azért ezt az ötvözetet választottam a kísérlethez, mert általánosan használják a mérnöki alkalmazásokban. A szimuláció a satu egyszerűsített változatát használja, és tartalmazza a munkadarab pozicionálására szolgáló mágneses fémlemezt is.

A szorítóerő nagysága a használt nyomaték alapján számítható ki, a (7) egyenlet segítségével, ami a korábbi egyenletek kombinálásának eredménye (4)–(6). Ebben az egyenletben a szorítóerő a „T” nyomaték és a „d_a” és „d₂” menetátmérő megadása után ismert, valamint az egyenlet eredménye.

$$F_o = \frac{2 \cdot T}{d_2 \cdot \tan(\alpha + p') + \mu \cdot d_a} = [N] \quad (7)$$

4.1.4. CMM mérések

A koordináta mérőgépek széles körben elterjedtek az ipari minőségbiztosítási és mérési folyamatokban. A munkadarabok fő geometriai és anyagi tulajdonságait az 1. táblázat mutatja be. A tesztek során egy újabb generációs Coord3 Universal 10/7/7 gépet használtunk, amely RENISHAW rendszerrel működik. Ez a beállítás lehetővé teszi a gép számára a felületek tapintó általi szkennelését (1. ábra). A Renishaw modul egy SP25M volt, amely egyenes vonalakon, „söprő” mozgásokon és szabad formájú felületeken is használható [111]. Az első tesztnél a használt tapintógömb rubin volt, de ebben az esetben a gömb a próbatest felületén pattogott, vibrációt okozva az eredményekben, és a gyártó javaslatai alapján SIN anyagú gömbre váltottunk. [112].



24. ábra CMM mérés beállítása és szkennelés a CMM beépített Touch DMIS rendszerben

Munka-darab.	Méreték (mm)	Hossz (mm)	Szélesség (mm)	Model mérete (mm)
1.	ALU6082 20x20	21 ±0.3	20.75 – 20.85	21x20x20
2.	ALU6082 20x20	40 ±0.3	39.85 – 39.95	40x20x20
3.	ALU6082 20x20	60.5 ±0.3	60.55 – 60.70	60.5x20x20
4.	ALU6082 40x40	41 ±0.3	40.9 – 41.15	41x40x40
5.	S355J2 41x14.5	59.5 ±0.3	59.25 – 59.35	59.5x41x14.5
6.	S355J2 59.5x14.5	41±0.3	41.00 – 41.10	59.5x41x14.5

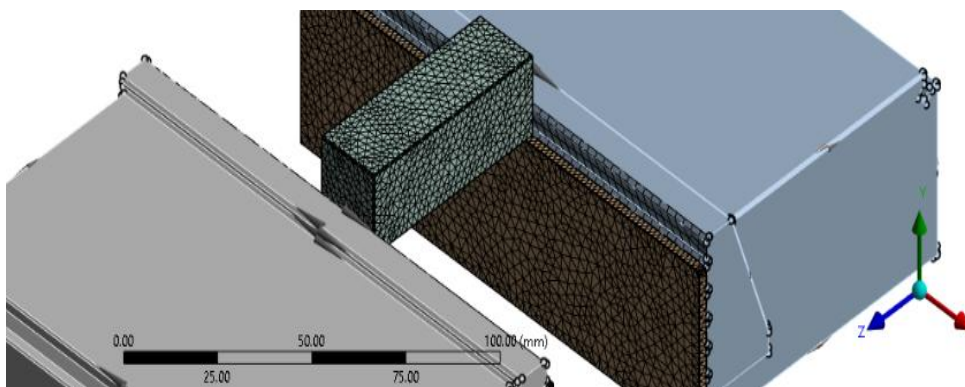
5. táblázat Mért geometriák és anyagok

Az ISO 10360 [113] szabvány alapján a méréseket állandó 21 +/- 1°C hőmérsékleten végeztük. A használt satu és a munkadarabok több mint 8 órát töltöttek el ezen körülmények között, hogy elkerüljük a hőmérséklet-különbség okozta problémákat. A felhasznált munkadarabokat egy extrudált 3 m hosszú rúdból fűrészeltük, így a végfelületek fűrészeltek; de a felület, ahol a méréseket végeztük, az eredeti hidegen húzott sima felülettel rendelkezett.

A satu kiválasztásakor a fő szempont volt, hogy egy univerzálisan és széles körben használható megfogó eszközt válasszak. Ezért a kísérletekhez egy Gerardi StandardFLEX satut használtam, 24 mm-es trapézmenetes orsóval és 5 mm-es menetemelkedéssel. A különböző nyomatékszintű fokozatok biztosítására egy $\frac{1}{2}$ hüvelykes normál, gyártói kalibrációval rendelkező nyomatékkulcsot használtam, ami 40-250 Nm tartományban használható.

A FEM szimulációban elkészült a satu és a munkadarab egyszerűsített geometriája, a satu testét acél S355 testnek, a munkadarabot pedig az „AlMgSi1” alumíniumötvözet anyagmodelljének modelleztem.

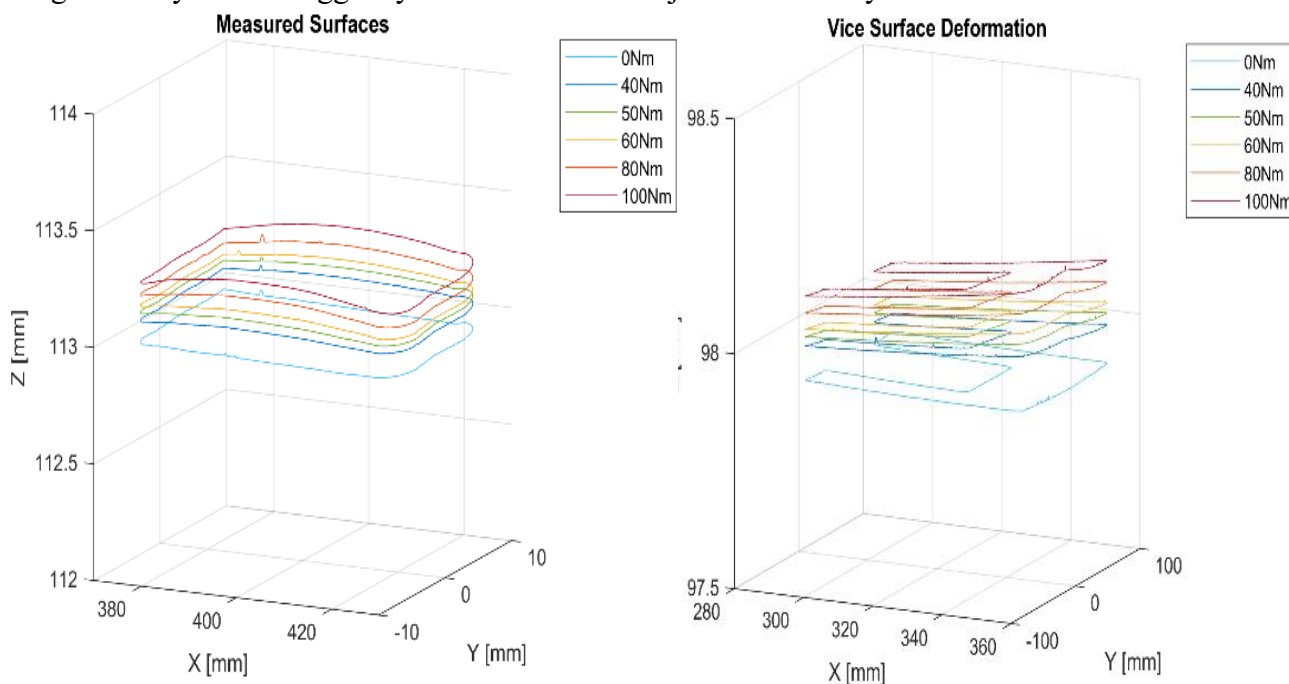
Ezt követően egy 3 mm-es hálóméretet és egy tetraéderekre hálótípust állítottam be. A szimulációban használt modell a 2. ábrán látható. A hátsó pofát a valóságnak megfelelően rögzítettük, a másik pofa pedig csak a Z tengely mentén mozdulhatott el. Z irányú erőt definiáltam a mozgó pofán, ami az elmozdulás miatt szorítóerőt fejtett ki a munkadarabra, a valóságnak megfelelően.



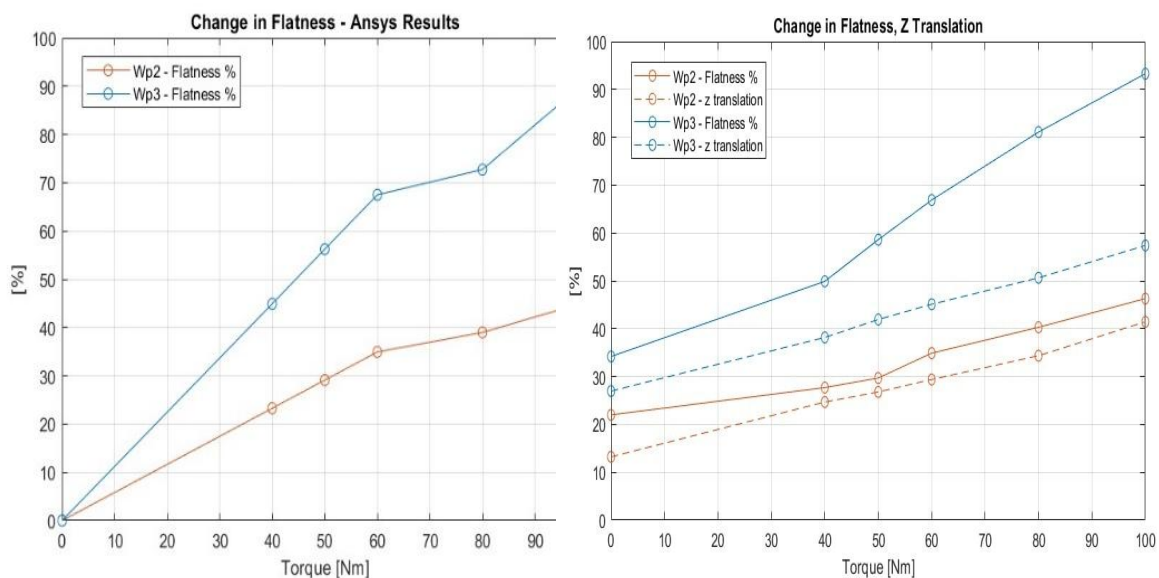
25. ábra Ansys szimuláció

4.1.5. Eredmények összesítése

A munkadarab felső felületén és a mozgó pofa felső felületén mért értékeket a meghúzási nyomaték függvényében a 3. ábra mutatja be a szorítónyomatékkal.



26. ábra CMM scan eredményei a mért felületeknek



27. ábra A 2. és 3. munkadarabok nyomaték- és erőértékei a Z tengely deformációival

Az eredmények az ábrán azt mutatják, hogy a munkadarab deformációja az egész felületen lineáris, és csak 100 Nm nyomatéknál figyelhető meg eltérés a satu pofája és a munkadarab között. Ez a jelenség normális, mivel a mozgó és stabil pofa eltérő hatást gyakorol

a munkadarabra a szorítás során. Az esetlegesen megjelenő véletlenszerű csúcserőértékek állandóak, és egy felületi hibából erednek, amely az egész vizsgálat során jelen van. Amennyiben ezeket az adatokat fejlett statisztikai modellek alapjául kívánjuk használni, a csúcserőértékeket el kell távolítani az adathalmazból. Ugyanakkor ezek az értékek felhasználhatók a FEM szimuláció és a valós deformációk összehasonlítására.

A grafikonok jó alapot biztosítanak a szimulált értékek összehasonlításával, hiszen a terhelés nélküli állapotban meghatározható a kezdeti síklapúság, amellyel kompenzálhatók a mérési eredmények.

A kompenzált értékekkel már közvetlenül összehasonlítható a szimuláció során kapott érték, ahol elméletileg tökéletes síkot alkalmaztam. Ennek megfelelően a 6. táblázat bemutatja a számított eredményeket.

Az eredmények összehasonlítása Schoppe E. és Vogel E. [114] tanulmányával. Ebben a tanulmányban sor került a megmunkálási erők által okozott síklapúság-változások szimulációjára, valamint a mért eredmények és a FEM szimulációs eredményeik közötti összevetésre. Megfigyelték, hogy a két adat között szinte állandó eltérés volt, amit lineárisnak minősítettek. Hasonlóan, a jelen tanulmányban is lineáris összefüggést figyeltünk meg a mért és a FEM eredmények között, amit úgy értelmeztünk, hogy a Z irányú eltolódás egy állandó értékkel változik.

M [Nm]	F [N]	Md 2			Md 3		
		Szim. def. [mm]	Mért. def. [mm]	Szim.. z [mm]	Szim. def. [mm]	Mért. def. [mm]	Szim.. z [mm]
40	12800	0.02328	0.0277	0.1147	0.04492	0.0499	0.1120
50	16000	0.02911	0.0297	0.1357	0.05624	0.0586	0.1495
60	19200	0.03494	0.0349	0.1617	0.06750	0.0669	0.1813
80	25600	0.03898	0.0403	0.2114	0.07274	0.0811	0.2366
100	32000	0.04539	0.0463	0.2823	0.09120	0.0933	0.3042

6. táblázat A 2. és 3. munkadarab FEM szimulációjának és mért értékeinek összehasonlítása

A 6. táblázatban bemutatott CMM-mérések eredményei nemcsak a munkadarabok síklapúságát befolyásoló konvexitást mutatják, hanem a Z tengely pozitív irányában bekövetkező eltolódás jelenlétét is, amelyet külön elemzés tárgyává kell tenni. A szimuláció eredményei, szintén a 6. táblázatban, kizárólag a felület konvexitását mutatják, amely a szorítási nyomaték munkadarabra gyakorolt síklapúsági hatását határozza meg.

A mért és FEM-eredmények összehasonlításából jelentős hasonlóság mutatkozott, amely a szimulált és mért adatok közötti egyezést igazolja.

A Md2 és Md3 munkadarabok 20x20 mm keresztmetszetű alumínium rudakból készültek, amelyek hossza 40 mm és 60 mm. A FEM-analízis eredményei azt mutatják, hogy a munkadarab deformációja teljes mértékben állandó és szimmetrikus, nincs különbség a mozgó és stabil satu pofa hatása között. A modell egy ideális modellt feltételez, amely nem veszi figyelembe a satu valós működését. Ez a megközelítés tudatos döntésen alapult, mivel eltérések csak nagyobb szorítási nyomatókoknál jelentkeztek, ahol a munkadarab olyan mértékű deformációt érhetett el, amely már tűréshatáron kívüli eltérést okozhat. Itt már a satu menetes orsója egy sugár értéket vesz fel.

4.1.6. Összefoglalás

Ideális esetben a befogott munkadarab felületének síknak kellene lennie. A kutatás bemutatott egy olyan módszert, amely a CMM méréseket és a FEM szimulációt kombinálva teszi lehetővé, hogy egy tipikus kis- vagy közepes méretű vállalat hatékonyan használja fel erőforrásait a szorítási nyomatók munkadarabra gyakorolt hatásának vizsgálatához. A CMM mérések során szondás pásztázó méréseket végeztek, hogy megvizsgálják a munkadarab és a satu pofa rugalmas deformációját. A kutatás feltárta, hogy a szorítási nyomatók milyen mértékben befolyásolja a munkadarab deformációját, és ez hogyan hat jelentősen a megmunkált alkatrészek pontosságára.

Az Ansys szimuláció kimutatta, hogy a szorítási nyomatók változtatásával a munkadarab felületének síklapúsága megváltozik, konvex alakot öltve. A deformáció mértéke a munkadarab anyagától, keresztmetszetétől és hosszától is függött. A mérések validálták a szimuláció eredményeit, mivel a síklapúság a vártak megfelelően változott, azonban egy további, a felület Z irányában történő eltolódást is kimutattak, amely szinte állandó mértékű volt minden további 10 Nm szorítási nyomatók esetén. Ennek figyelembevétele elengedhetetlen a szimulációkban, hogy azok a valóságnak megfelelő eredményeket adjanak.

Ezenkívül a munkadarab kalapálási hatását is vizsgálták, amely néhány mikronos lefelé irányuló eltolódást eredményezett a felület eredeti helyzetéhez képest. A megmunkálási erő kiszámításával meghatározható az optimális szorítóerő, így a nyomatók is, amely lehetővé teszi a túlzott szorítás munkadarabra gyakorolt káros hatásainak csökkentését.

Az általunk bemutatott eljárás egy hibrid módszer, amely az analitikus megoldások, a FEM-szimulációk és a mért adatok kombinálásával hoz létre egy olyan adatbázist, amely segítségével meghatározható az ideális szorítási nyomaték. Ez lehetővé teszi az elvárt, ismert munkadarab-deformáció előrejelzését, amely csökkentheti a gyártási rendszer felesleges terhelését. Az Ansys szimuláció eredményei a mért eredményekkel való összehasonlítás után validálhatók, mivel jelentős hasonlóság figyelhető meg közöttük. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a szimuláció csupán a szorítási nyomaték által okozott felületi eltolódás értékét nem veszi figyelembe. Ezek az eredmények azért fontosak, mert irányt mutatnak a jövőbeni, valósághűbb szimulációk számára, amelyek pontosabban meghatározhatják a munkadarabok ipari deformációit. A kutatás eredményei alapján kidolgozható egy hasznos adatbázis, amely megfelelő lépéseket biztosít a megmunkálási erők által előidézett tőrésmezőnek megfelelő szorítási-nyomatékértékek meghatározásához. Ez az adatbázis feltölthető a vállalat MES-rendszerébe vagy bármilyen szabványosított adatbázisba, amelyet rendszeresen karban kell tartani. Az eredmények és a kísérletek jól alkalmazhatók további kutatásokhoz, ahol bonyolultabb alkatrészeket vizsgálnak majd.

4.2. CNC megmunkálógép mérési képességének vizsgálata

CNC megmunkálógép mérési képességének vizsgálata többféle etalonnal és külső CMM ellenérés segítségével.

Az adatokat felhasználva további karbantartási, kapacitástervezési és folyamatértékelési feladatokban is lehet alkalmazni őket. Hosszú távon így előkészíthető és kivitelezhető az embertől független gyártás és ellenőrzés is [116].

4.2.1. Vizsgálati eszközök, módszerek, eredmények

A vizsgálat során az AKIRA SEIKI univerzális 3+1 tengelyes marógépet használtam, amely Renishaw OMP40-2 mérőtapintóval van felszerelve. A gép és a mérőrendszer pontosságára vonatkozó adatok a gépek bemutatása fejezetben találhatók. Az ipari minőségbiztosítás szempontjából alapvető jelentőségű a mérő- és ellenőrző berendezések pontosságának rendszeres vizsgálata, különösen a „nulla hiba” gyártási célkitűzés elérése érdekében. Ezért elengedhetetlen a berendezések állapotának részletes ismerete. A koordináta mérőgépekre vonatkozóan a DIN EN ISO 10360-2:2009 szabvány előírja a rendszeres és meghatározott időközönként végrehajtandó kalibrálási eljárásokat, valamint az ismétlési pontosság vizsgálatát.

A méréseket mind a CNC gépen belül, mind a koordináta mérőgépen a DIN EN ISO 3650 szerinti 2. pontossági osztályú mérőhasábokkal és kalibráló gyűrűvel végeztük el, 20°C-on. A kalibráló gyűrű névleges méretéhez képest -0,32 µm eltérést mutatott, amelyet a kalibráció során határoztam meg.

A mérési bizonytalanság a mérőeszköz gyártója által megadott, szabvány szerinti összefüggéssel határozható meg:

$$U=1.5 \cdot 10^{-6} \cdot L \quad (1)$$

ahol esetünkben:

$$U=1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \text{ mm}=0.03 \text{ } \mu\text{m}, 0,0003 \text{ mm}$$

Az etalon alapanyagának lineáris hőtágulási együtthatója a gyártói adatok alapján $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

A kísérletek során minden mérési sorozatot hatvanszor ismételt meg, majd az eredményeket és a különböző mérési módszerek közötti eltéréseket statisztikai elemzésekkel értékeltem. Az elemzések megkezdése előtt különösen fontos volt a berendezés pozicionálási pontosságának ismerete, amely a gyártói dokumentációból vagy akkreditált szervezetek által végzett vizsgálatokból származtatható. A CNC gép esetében a lineáris pozicionálási pontosságot lézeres interferométeres kalibrációval javították és ellenőrizték.

A gyártói előírás szerint a mérések megkezdése előtt a tapintó sugárirányú ütését be kellett állítani. Ezt „ezredes” pontosságú Mitutoyo mérőtapintó segítségével végeztem, amelynek kalibrációs jegyzőkönyve a dolgozat függelékében található. A szoftver legfeljebb $\pm 2,5 \mu\text{m}$ radiális irányú ütést képes kezelni, azonban az aktuális mérés során $\pm 1 \mu\text{m}$ eltérést tapasztaltam, amelyet az adapter csavarjainak finomhangolásával korrigáltam. Fontos hangsúlyozni, hogy ez egy kritikus művelet, amelyet üzemi körülmények között kizárólag erre kijelölt és felelős személy végezhet, mivel a mérések és az egész megmunkálási folyamat pontosságára jelentős hatással van.

A mérendő munkadarabot először a CNC gépen helyeztük el és rögzítettük, majd ismert pozíció alapján közelítettük meg meghatározott sebességgel. A méréseket előre definiált pontokon érintve végeztük, és a szoftver segítségével a pontok koordinátái közötti távolságot számítottuk ki. A munkadarab pontos rögzítését a satukon található függőleges segédlapok és párhuzamos pofák biztosították. A megfogáskor - mivel érintő mérésekről van szó - nem alkalmaztunk 15 Nm-nél nagyobb meghúzási nyomatékot, így a deformáció elkerülhető volt.

További méréseket gyűrűetalonokon hajtottunk végre, ahol a gyártó által megadott 63,0021 mm-es furatátmérő szolgált referenciaértékként. A satuba helyezett gyűrűetalon megfelelő pozicionálását a korábban már említett „ezredes” Mitutoyo mérőórával végeztem el. A mérési folyamat megkezdése előtt meghatároztuk a gyűrű helyzetét, majd a középpontot kiindulási pontként rögzítettük. A mérés során a tapintó négy pontot érintett meg a gyűrű belső felületén, amely adatok alapján a szoftver egy elméleti kör segítségével számította ki az átmérőt. Az eredményeket az 7. táblázatban mutatjuk be.

	x irány	y irány	gyűrű
Átlag [mm]	20.0018	20.0000	63.0024
Átlagos eltérés [mm]	0.0021	0.0005	0.0003
Szórás [mm]	0.0003	0.0006	0.0003
Minimum m [mm]	20.0008	19.9991	63.0019
Maximum m [mm]	20.0027	20.0013	63.0030
+2 σ szórás [mm]	20.0024	20.0012	63.0030
-2 σ szórás [mm]	20.0011	19.9989	63.0018

7. táblázat Mérési eredmények (CNC megmunkológép terében)

A további mérésekhez a Savaria Műszaki Intézet mérés technikai laboratóriumában található koordináta mérőgépet használtam. Ez a gép Renishaw mérőrendszerrel és TouchDMIS szoftverrel van felszerelve, amelynek pontossága a DIN EN ISO 10360-2 szabvány szerinti kalibrációs tanúsítvány alapján számítható ki az adott hosszokra .

$$MPE=\pm(15\text{ }\mu\text{m}+L/333) \quad (2.)$$

ami esetünkben:

$$MPE=\pm(1.5\text{ }\mu\text{m}+20\text{ mm}/333)=1.56\text{ }\mu\text{m}$$

A mérések megkezdése előtt kalibrációs gömb segítségével kalibráltam a mérőgépet, és ellenőriztem, hogy a hibája nem haladja meg a megengedett tartományt. Ezt a kalibrációt az előírt időközönként, általában hetente egyszer, kell elvégezni, a használatától függően.

A méréseket mind mérőhasábokon, mind gyűrűs idomszeren végeztem. A folyamat megkezdése előtt biztosítani kellett az állandó laboratóriumi hőmérsékletet, amely esetünkben $21 \pm 1^\circ\text{C}$ volt. A mérőgép beépített hőmérséklet-kompenzációval rendelkezik, amely több ponton figyelembe veszi a környezet és a készülék hőmérsékletét, továbbá beállítható a mért test hőtágulási együtthatója is .

A méréseket a koordináta mérőgépen különböző módszerekkel végeztük, mérőhasáb esetén két pont között, illetve két sík között. A munkadarabok megfogásakor ugyanúgy jártunk el, mint a megmunkáló gépen történő méréseknél, vagyis a satuban ugyanolyan pozícióban és módon rögzítettük őket, mint korábban. Gyűrűs etalon használatakor kilenc pontos és szkennelt mérést végeztünk, hogy ne csak a mérőműszerek, hanem a mérési módszerek is összehasonlíthatók legyenek.

A pont-pont közötti mérések ugyanúgy történnek koordináta mérőgép használatakor, mint a CNC megmunkáló központnál. A sík-sík mérés során a koordináta mérőgép-szoftver egy elméleti síkot illeszt a pontokhoz, majd megadja a két eredményül kapott sík távolságát. Itt beállítható, hogy milyen módszer szerint történjen a mérés értékelése, legyen az minimum, maximum vagy Csebisev-polinomok alapján. Érdekes kérdés, hogy mennyire hasonlóak és egyenértékűek a pont-pont közötti és a síkok közötti mérések esetünkben, illetve van-e bármiféle kiugró hibával vagy trenddel összekötött jellemzőjük.

Az összehasonlítás érdekében a már bemutatott F próbát használom, ahol a varianciák, vagyis először a szórások összehasonlítása a feladat.

	két pont között	két sík között
Várható érték	19,99942	19,99929
Variancia	3,31E-06	4,5E-06
Megfigyelések	210	217
df	209	216
F	0,735001	
P(F<=f) egyszélű	0,012738	
F kritikus egyszélű	0,797357	

8. táblázat F próba 20 mm mérőhasábokra

Az F próba eredményeiből egyértelműen látszik, hogy az F értéke lényegesen nagyobb, mint a $P(F \leq f)$ egyszélű értéke. Ez azt jelenti, hogy az eredmények alapján elvégezhető a kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzetek esetére. A kétmintás t-próba célja annak meghatározása, hogy a két vizsgált változó átlagai statisztikai szempontból megegyeznek-e. Az alábbi 9. táblázatban találhatóak a T próba eredményei.

A T próba során a nullhipotézis azt állítja, hogy a két vizsgált változó átlagai megegyeznek. Az eredmények azt mutatják, hogy a T érték lényegesen nagyobb, mint a t kritikus egyszélű értéke. Ez azt jelenti, hogy a nullhipotézisnek eleget teszünk, vagyis a két változó átlagai statisztikai szempontból megegyeznek. Az egyszélű próbát választottam, mivel az eltérés iránybelisége ebben az esetben nem számottevő, így felesleges lenne a kétszélű próba elemzése.

	két pont között	két sík között
Várható érték	19,99942	19,99929
Variancia	3,31E-06	4,5E-06
Megfigyelések	210	217
Súlyozott variancia	3,91E-06	
Feltételezett átlagos eltérés	0	
df	425	
t érték	0,711659	
$P(T \leq t)$ egyszélű	0,238533	
t kritikus egyszélű	1,648447	
$P(T \leq t)$ kétszélű	0,477067	
t kritikus kétszélű	1,965561	

9. táblázat T próba a 20 mm-es CMM-en végrehajtott mérőhasáb mérésekre.

A kör átmérőjének pontok alapján történő meghatározásakor a tapintás pontosan úgy működik, mint CNC gépen történő mérés. A szkennelt felület esetében a teljes felületen felvett 2400 pontból határozható meg az adott érték.

A kilencpontos gyűrűmérés során az első öt mérési pont a kalibráló gyűrű elülső felületéhez tartozik. Ennek célja a mérendő tárgy pozicionálási hibáiból adódó pontatlanságok kompenzálása. A mérési sík felvételekor ügyelni kell arra, hogy a tapintások elkerüljék a kalibrációs vagy érvényességi matricákat és egyéb jelöléseket. A további négy pont megérintésével a szoftver meghatároz egy elméleti kört.

A kör átmérőjének meghatározásakor a tapintás pontosan úgy működik, mint a CNC gépen történő mérés. A szkennelt felület esetében a teljes felületen felvett 2400 pontból határozható meg az adott érték [93].

	két pont között	két sík között	kör (9 pont)	kör (szkennelt)
Átlag [mm]	20.0004	19.9994	63.0023	63.0024
Átlagos eltérés. [mm]	0.0008	0.0002	0.0002	0.0003
Szórás [mm]	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
Minimum [mm]	20.0003	19.9993	63.0021	63.0023
Maximum [mm]	20.0006	19.9995	63.0026	63.0026
+2 σ szórás [mm]	20.0007	19.9996	63.0026	63.0026
-2 σ szórás [mm]	20.0002	19.9993	63.0020	63.0022

10. táblázat Mérési eredmények (CMM)

A 11. táblázat eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a mérési rendszereink között nincs szisztematikus hiba. A megfigyelt változók szórása minden mérési eljárás esetén az elfogadható tartományon belül van. Mivel a vizsgált mérési eredmények bizonytalansága egy nagyságrenddel kisebb, mint a mérőrendszereink pontossága, megállapítható, hogy a két mérési rendszer az adott alkalmazásnál egyenértékű. A szórások vizsgálatára célszerű egy F próbát elvégezni, azonban a pontossági értékek miatt a T próba 5%-os szignifikancia szint mellett vagy teljesíteni fogja, vagy éppen nem fogja teljesíteni a nullhipotézist.

	két pont között CMM	két pont között CNC
Várható érték	19,99942381	20,00133889
Variancia	3,30613E-06	1,0159E-05
Megfigyelések	210	36
df	209	35
F	0,325437916	
P(F<=f) egyszélű	3,3756E-07	
F kritikus egyszélű	0,675840227	

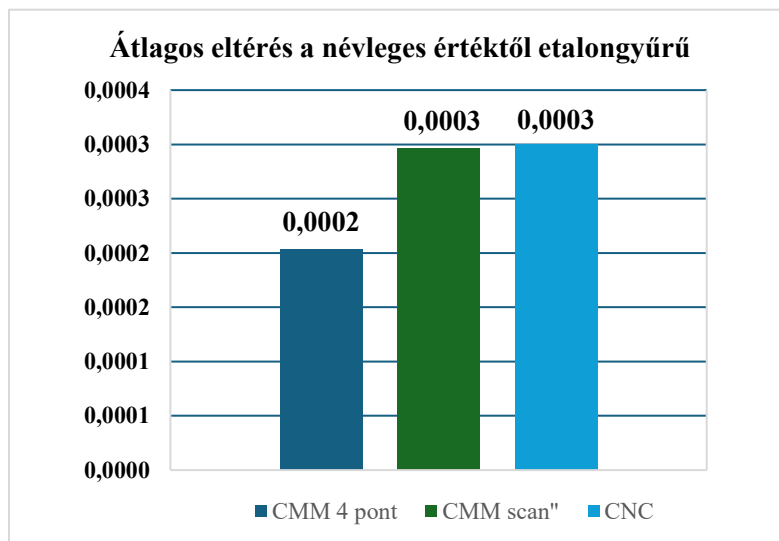
11. táblázat két pont közötti CMM és CNC gépben történő mérések összehasonlítása

A táblázatból jól látható, hogy bár a variancia és így a szórások nagyon közel állnak egymáshoz, a várható értékek eltérése már olyan mértékű, hogy nem lehet egyértelműen megállapítani, mennyire egyeznek meg az átlagok. Emiatt T próbát végeztünk, amelynek eredményei az alábbi táblázatban találhatók.

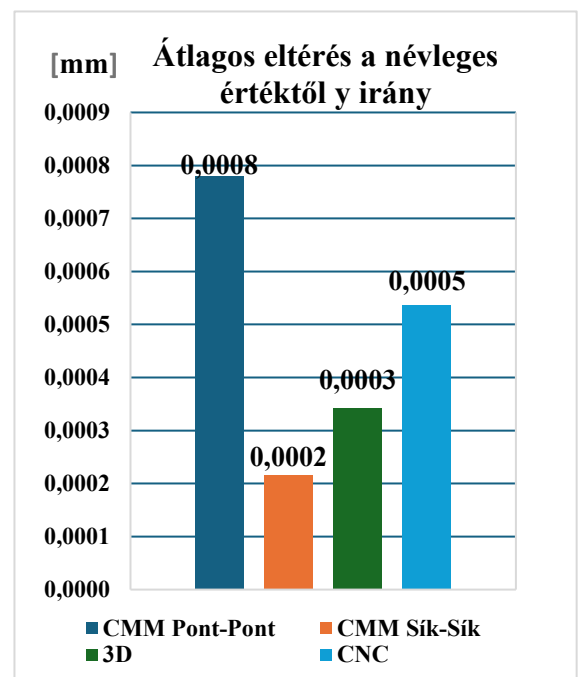
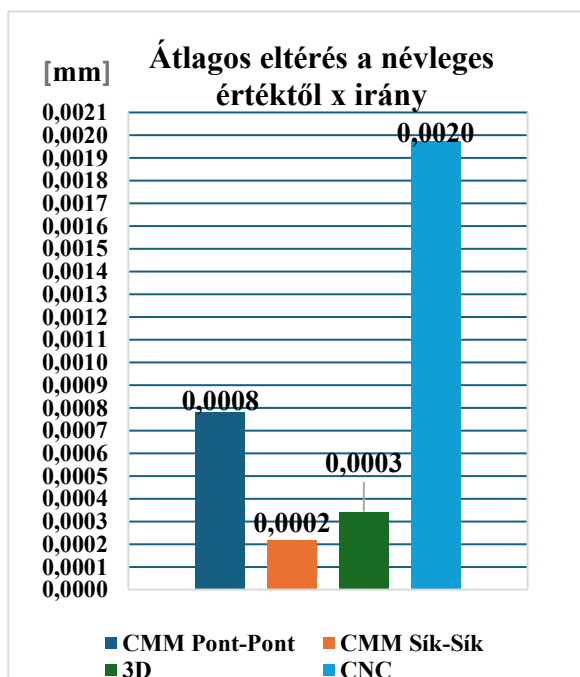
	két pont között CMM	két pont között CNC
Várható érték	19,99942381	20,00133889
Variancia	2,44805E-07	1,0159E-05
Megfigyelések	41	36
Súlyozott variancia	4,87144E-06	
Feltételezett átlagos eltérés	0	
df	75	
t érték	-1,335079365	
P(T<=t) egyszélű	0,092944365	
t kritikus egyszélű	1,665425373	
P(T<=t) kétszélű	0,185888731	
t kritikus kétszélű	1,992102154	

12. táblázat T próba CMM és CNC pont pont közötti mérésekre

A T próba elemzésekor a t érték abszolút értékét vesszük figyelembe, ami 1,335. Ezt összehasonlítjuk a korábban említett t kritikus egyszélű értékkel, amely 1,6654. Az utóbbi értéknek nagyobbnak kell lennie, és ebben az esetben a T próba eredményei eleget tesznek a nullhipotézisnek. A statisztikai kiértékelés alapján mérőrendszereink egyenértékűnek tekinthetők.



28. ábra Etalongyűrű mérések átlagos eltérései



29. ábra 20mm mérőhasábokra végrehajtott X és Y irányú eltérések átlagos nagyságai

4.2.2. Összegzés, a kutatás célja és hasznosítási területe

A mérési értékek megfelelő kezeléséhez és felhasználásához elengedhetetlen az adatok optimális feldolgozása. A rendkívül összetett műszaki alkatrészek gyártása, amelyek számos specifikációval rendelkeznek, megköveteli a vállalatoktól, hogy gyors ellenőrző eszközökkel rendelkezzenek a megfelelőségi mérésekhez és vizsgálatokhoz. Ebben az összefüggésben a mérés technika kulcsfontosságú szerepet játszik az innovációs és fejlesztési folyamatok, valamint a gyártás támogatásában. A metrológia megfelelő alkalmazása és a mérőszámok helyes felhasználása lehetővé teszi a technológiai fejlődés nyomon követését az Ipar 4.0 elveivel összhangban, biztosítva a gyártási folyamat megbízhatóságát és a műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségét.

Ennek a folyamatos fejlődésnek köszönhetően a vállalatok egyre összetettebb mérési eszközöket igényelnek, amelyek képesek biztosítani a mérési funkciók helyes elvégzését. A műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségének biztosításának növekvő igénye koordináta mérőgépekkel történő ellenőrzéssel teljesíthető. Ez a technológia támogatja a gyors ellenőrzést, és nagy mennyiségű adat előállítására képes, javítva a gyártási folyamattal való interakciót a megfelelőség garantálása érdekében.

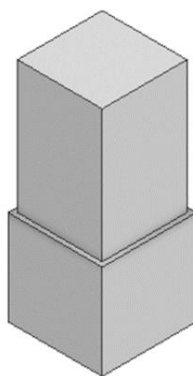
Az újonnan kalibrált marógépbe integrált mérőrendszer pontossága könnyen megfelel a gyártó által megadott tűrésmezőknek. A tapasztalatok alapján a mérés jellemzően gyors, és a kapott adatok a MES rendszer segítségével könnyen továbbíthatók és tárolhatók.

A munkadarabok gyártás utáni mérése az egyik legelterjedtebb, mégis legtöbbet vitatott terület a minőségbiztosítás és a termék megfelelőség szempontjából. A legegyszerűbb példa a sokféle méret és tűrés alkalmazása, majd az ezekre mutató valódi igény, amely gyakran csak a termék összeszerelése során, vagy a használatból származó adatok alapján módosul. A szükségtelenül szűk tűréstartomány gyakran megsokszorozza az adott megmunkálás költségeit, nem beszélve a szükségtelen környezetterhelésről. A kutatásban használt CNC szerszámgép integrált munkadarabmérő rendszere a gyártó által meghatározott tűréstartománynál lényegesen szűkebb tűréssel képes méréseket végezni. A CMM mérőgép a CNC megmunkálógép kiváló felügyeleti eszköze, mivel a mérési folyamat szinte azonos lehet. Ennek alapján könnyen integrálható és feldolgozható adatokat kapunk a termelési rendszerünk számára.

4.3. 3D technológiákat támogató mérések kiértékelése

4.3.1. A vizsgált próbatest

Geometriai szempontból 10 darab négyzetes hasábot készítettem, mivel ezek könnyen és precízen mérhetők. A hasábok mérete 18x18 mm alapterületű és 40 mm magas, amelyeket PRUSA 3D nyomtatóval és Prusament PLA filamenttel gyártottam. A folyamat során a következő paramétereket alkalmaztam: fűvóka átmérője 0,4 mm, pontosság 0,025 mm, rétegvastagság 0,3 mm, és a szobahőmérséklet 20-23°C között volt.



30. ábra Elméleti geometria

4.3.2. A kapott eredmények kiértékelése

Az első mérési sorozatot digitális mikrométerrel végeztem, amely az MM-3109 sorozatszámú Insize digitális mikrométer volt. Ennek az eszköznek a gyártói pontossága $\pm 2 \mu\text{m}$, felbontása pedig $1 \mu\text{m}$. Fontos megjegyezni, hogy a felületi egyenetlenségeket a mérőeszköz felülete miatt átlagolni kell. Az eredmények az 13. táblázatban találhatók.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	17,843	17,868	17,881	17,894	17,893	17,907	17,913	17,863	17,866	17,862
Y	17,906	17,92	17,877	17,852	17,918	17,917	17,867	17,871	17,866	17,865

13. táblázat Mikrométeres mérések X és Y irányban

A következő mérési sorozat az ipar minden területén elterjedt tolómérős mérés volt. A méréshez a TM-1109 sorozatszámú Insize tolómérőt használtam, melynek gyártói pontossága $\pm 20 \mu\text{m}$, felbontása $10 \mu\text{m}$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	17,97	18	18,01	18,01	18,03	17,97	17,99	17,99	18,01	17,98
Y	18	18,04	17,98	17,98	17,96	17,95	17,96	18	18	18,01

14. táblázat Tolómérővel történt mérések eredményei

A két mérési sorozat első látásra nagyon hasonló, ugyanis nincsenek kiugró különbségek. Emiatt további statisztikai kiértékelés szükséges, aminek eszközeként először az F próbát választottam, hogy a szórások közötti különbségeket vizsgálhassam. Ennek eredménye X és Y mintákra alább található:

Kétmintás F-próba a szórásnégyzetre X elemek esetén		
	X tolómérő mérés	X mikrometer mérés
Várható érték	17,879	17,996
Variancia	0,000499556	0,000382222
Megfigyelések	10	10
df	9	9
F	1,306976744	
P(F<=f) egyszélű	0,348256564	
F kritikus egyszélű	3,178893104	

15. táblázat Kétmintás F próba a szórásnégyzetekre X irányban

Kétmintás F-próba a szórásnégyzetre Y elemek esetén		
	Y tolómérő mérés	Y mikrometer mérés
Várható érték	17,8859	17,988
Variancia	0,000689433	0,000751111
Megfigyelések	10	10
df	9	9
F		0,917884615
P(F<=f) egyszélű		0,450264606
F kritikus egyszélű		0,314574906

16. táblázat Kétmintás F-próba a szórásnégyzetre Y irányban

A két mérést összehasonlítva a szórás között F próba alapján nincs szignifikáns különbség, így a kétmintás T próbát választottam egyenlő szórásnégyzetre.

Kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzeteknél		
	X tolómérő mérés	X mikrometer mérés
Várható érték	17,879	17,996
Variancia	0,000499556	0,000382222
Megfigyelések	10	10
Súlyozott variancia	0,000440889	
Feltételezett átlagos eltérés	0	
df	18	
t érték	-12,45966274	
P(T<=t) egyszélű	1,37445E-10	
t kritikus egyszélű	1,734063607	
P(T<=t) kétszélű	2,74889E-10	
t kritikus kétszélű	2,10092204	

17. táblázat Kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzeteknél X irányban

Kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzeteknél		
	Y tolómérő mérés	Y mikrometer mérés
Várható érték	17,8859	17,988
Variancia	0,000689433	0,000751111
Megfigyelések	10	10
Súlyozott variancia	0,000720272	
Feltételezett átlagos eltérés	0	
df	18	
t érték	-8,506725347	
P(T<=t) egyszélű	5,05475E-08	
t kritikus egyszélű	1,734063607	
P(T<=t) kétszélű	1,01095E-07	
t kritikus kétszélű	2,10092204	

18. táblázat Kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzeteknél Y irányban

A T próba eredményei alapján a nullhipotézis elvethető, mivel a két mintában a valószínűségi változók átlagai szignifikánsan eltérnek egymástól. Ez azt jelenti, hogy a két mérés nem felcserélhető egymással.

Az eltérő eredményeket okozhatja a mérőeszközök különböző felületi kialakítása; a mikrométer tapintója egy adott felületi átlagot mér, míg a tolómérő belemér a résekbe is. Ezt a szórások eltérése is alátámasztja. Ebben az esetben lehetőség van az értékek különbségének abszolútértékének vizsgálatára, mivel itt nem a teljes mérethez, hanem a különbséghez viszonyítunk. Az így elvégzett F próba eredményei alapján a szórásnégyzetek megegyezőnek tekinthetők, ami nem újdonság, hiszen a korábbi értékeknél kisebb szórásokkal számoltunk.

Kétmintás F-próba a szórásnégyzetre		
	X mérések különbsége	Y mérések különbsége
Várható érték	0,117	0,1021
Variancia	0,000691	0,001457
Megfigyelések	10	10
df	9	9
F	0,474182	
P(F<=f) egyszélű	0,140795	
F kritikus egyszélű	0,314575	

19. táblázat Különbségek a mérési eljárások között és azokon F próba

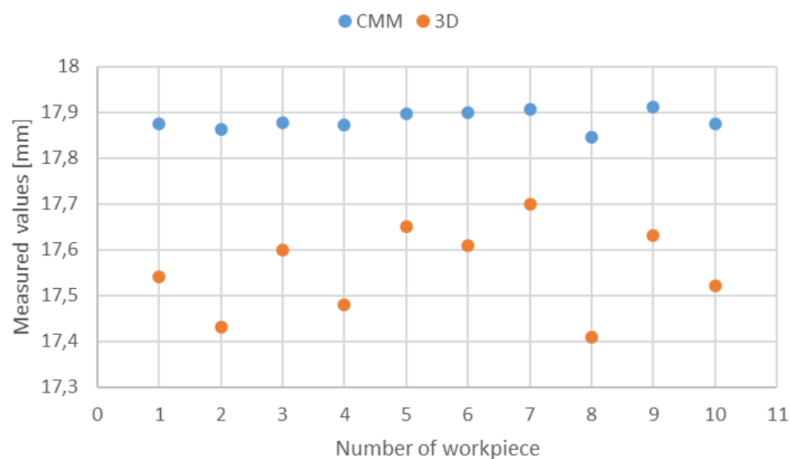
Kétmintás t-próba egyenlő szórásnégyzeteknél		
	X mérések különbsége	Y mérések különbsége
Várható érték	0,117	0,1021
Variancia	0,000691	0,001457
Megfigyelések	10	10
Súlyozott variancia	0,001074	
Feltételezett átlagos eltérés	0	
df	18	
t érték	1,016831	
P(T<=t) egyszélű	0,161354	
t kritikus egyszélű	1,734064	
P(T<=t) kétszélű	0,322707	
t kritikus kétszélű	2,100922	

20. táblázat Módosított T próba a mérési eljárások különbségeire

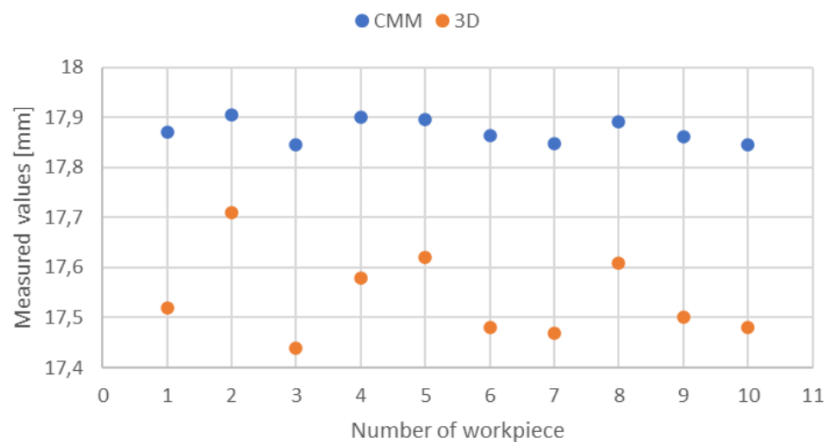
A módosított F próba alapján egyenlő szórásnégyzetre végrehajtható a T próba.

A T próba eredményei alapján a nullhipotézis teljesül, ami azt jelenti, hogy a két adatsor azonos mintából származik, és a két mérési sorozat különbsége már egy adatsornak tekinthető. Ez alapján kijelenthető, hogy a két mérési eljárás nem felcserélhető, de jól kiegészítik egymást. Az alábbi eljárással kapott eredmény statisztikailag elfogadható és folyamatparaméternek tekinthető.

A következő diagramokon a koordináta mérőgéppel és a 3D szkennelés által kapott eredményeket hasonlítom össze.



31. ábra Koordináta mérőgép és 3D szkennelés értékei X irányban



32. ábra Koordináta mérőgép és 3D szkennelés értékei Y irányban

A kezdeti beállításoknál szükség van egy kellően pontos mérőgép általi ellenmérésre. További ellenőrzési lehetőség, hogy a felületekre idomszert helyezünk, és így hajtjuk végre a mérést, így csak a legmagasabb pontokat fogja átlagolni az adott mérés.

Az eredmények szerint az összeállítás alkalmas lehet az MSZ ISO 2768-1:1991 szabvány c pontossági osztályába tartozó alkatrészek automatizált ellenőrzésére, továbbá ebben az esetben a tolómérő kiváltására. A mért eredmények különbségei a pontfelhők egymásra helyezésével ellenőrzőként is használhatók. Pontosabb mérés lehetséges jobb szoftveres háttérrel és fejlettebb erőforrásokkal, továbbá a precizitást nagyban befolyásolja a kiinduláskori beállítás és az iterációk száma is.

A 3D szkennerek nagy előnye a koordináta mérőgéppel szemben, hogy nem kell új mérést végeznünk egy új méret leolvasásához, a teljes modell kiértékelhető, és anyagi szempontok alapján is kedvezőbb választást jelent. A könnyű telepíthetőség és mobilitás is a 3D szkennerek mellett szól.

Kutatásom alapján további célom a gyártás előtti, adott körülményeknek megfelelő, illetve gyártás közbeni korrekció az adatkommunikációs lehetőségek és az általam készített adatsorok alapján. További fejlesztési potenciált tartalmaz a felületi pontatlanságok változásának megértése a 3D nyomtatás kismértékben változó körülményeinek esetében. Itt különösen a termékek belső kitöltési mintáinak méretpontosságra gyakorolt hatását lehet jól vizsgálni. A felületi képsorok összehasonlítása a gép paramétereinek a használat során történő megváltozásának értékeléséhez is hasznos adatot nyújt. Ipari felhasználásban a HP szkennerek közepes és kis kategóriájú sorozatokhoz használható.

4.4. Machine learning folyamatokat támogató mérések kiértékelése

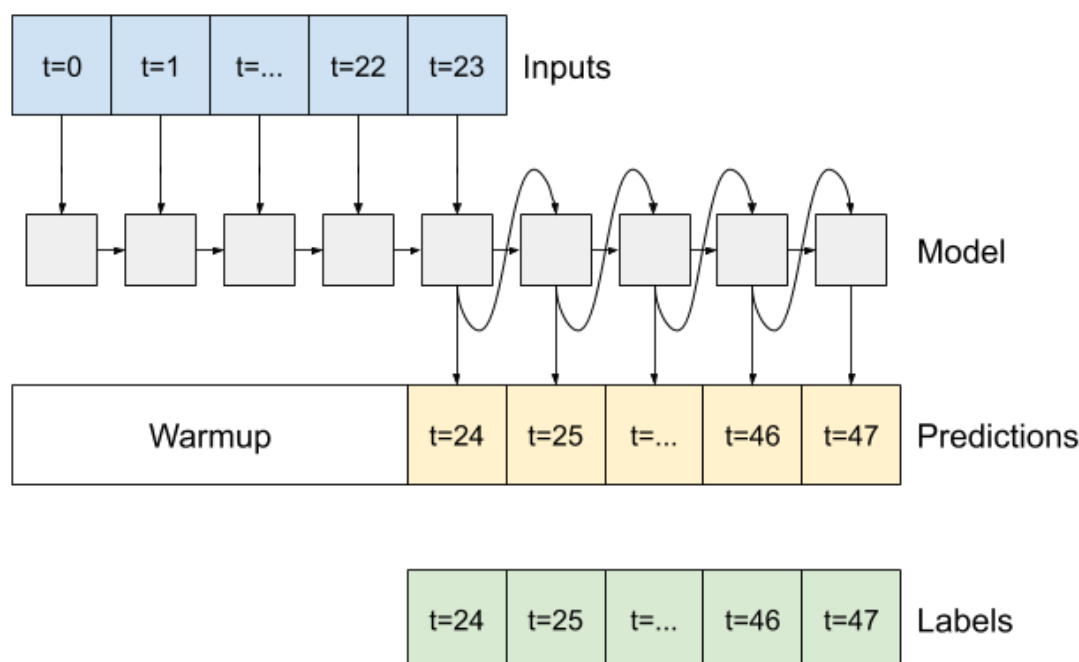
A probléma természetéből fakadóan olyan megoldást igényel, amely képes előre jelezni az idősorok több jellemzőjét. Mivel a probléma nemlineáris, a standard matematikai megközelítés statisztikával nagyon nehéz lenne, ezért kerestünk megfelelő gépi tanulási megoldást. Rengeteg gépi tanulási megoldás létezik az ehhez hasonló problémákra, például vannak felügyelt gépi tanulási modellek, amelyek a statisztikai tanulási modellektől eltérően nem csak statisztikákat használnak, hanem kapcsolatot keresnek az adatokban, ill. olyan probléma, mint az idősorok, alkalmazkodni tudnak az idősor trendjéhez [123].

Mivel a múltban volt néhány sikeres projektünk neurális hálózatokkal, ezért olyan neurális hálózati megoldást kerestünk, amely képes megoldani egy ilyen problémát. Egy neurális hálózat úgynevezett „neuronokat” használ a jellemzők előrejelzésére, amelyek a bemeneti adatok jellemzői alapján aktiválhatók vagy deaktiválhatók. A neuronoknak több rétege van, és végül a neuronok állapotából lehet előrejelzést adni [124]. A legegyszerűbb neurális hálózati modellek csak egyetlen jellemzőt képesek előre jelezni, vagy csak egy lépést tudnak előre meghatározni az időben, de olyanra volt szükségünk, amely minden tulajdonságot előre jelez, és időben több előrelépést is képes prediktálni.

4.4.1. Az RNN módszer rövid áttekintése

Az értékeléshez az Autoregressive Recurrent Neural Networks (RNN) megoldást választottuk. Autoregresszívnek kell lennie, mert akkor az általunk előre jelzett adatok visszacsatolásra kerülnek a modellbe, és a modell ezek alapján előrejelzi a következő lépéseket időben,. Ezzel ellentétben a Single-shot modellekkel, amelyek bár kevésbé erőforrásigényesek, és így gyorsabbak, mert egyszerre számolják ki a már meglévő modell alapján az adatot, de nem veszi bele a számításba a prediktált értéket is, így lépések maradnak ki a szekvenciából [125]. Az így kapott adatok a valósághoz sokkal kevésbé közel álló értéket adnak, különösen, ha több értéket is előre akarunk jelezni. Az RNN pedig egy széles körben használt modell az idősorok előrejelzésére, és jó tapasztalataink vannak ezzel. Az előző modell típusok továbbfejlesztésének eredménye (Lineáris, Dense, CNN (Convolution Neural Network)), egy úgynevezett hosszú rövid távú memóriaréteget (LSTM) használ, melynek segítségével folyton fenntart egy belső állapotot, és a bemeneti adatokat „Warmup”-ként használja (beállítja a neuronok állapotát), majd elindítja az előrejelzéseket.

A programozáshoz Python nyelvet és a tensorflow API-ját használtuk a modell létrehozásához. [126].



33. ábra Az autoregresszív RNN előrejelzés folyamata [128]

$X_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma(X)}$ Amikor elkezdünk dolgozni a modellen, először normalizálnunk kell az összegyűjtött adatokat. Ha az értékek sorában túl nagy a minimum és a maximum érték különbsége, akkor a modellnek sokkal nagyobb adattartománnyal kell dolgoznia, és így a modell nagyon lassú és erőforrás-igényes lesz. Ellenben egy modell nagyon könnyen kezeli a $0,0 \dots 1,0$ közötti számokat (és az ehhez közeli számokat), ezért az adatokat normalizálnunk kell. A normalizáláshoz minden jellemzőre kiszámítottuk az átlagot és a szórást, majd minden sorból kivontuk az átlagot és elosztottuk a szórással, ennek a folyamatnak a helyes elvégzése kiemelten fontos a további számításokhoz [127].

```
In [11]: x_train_mean = x_train_df.mean()
x_train_std = x_train_df.std()

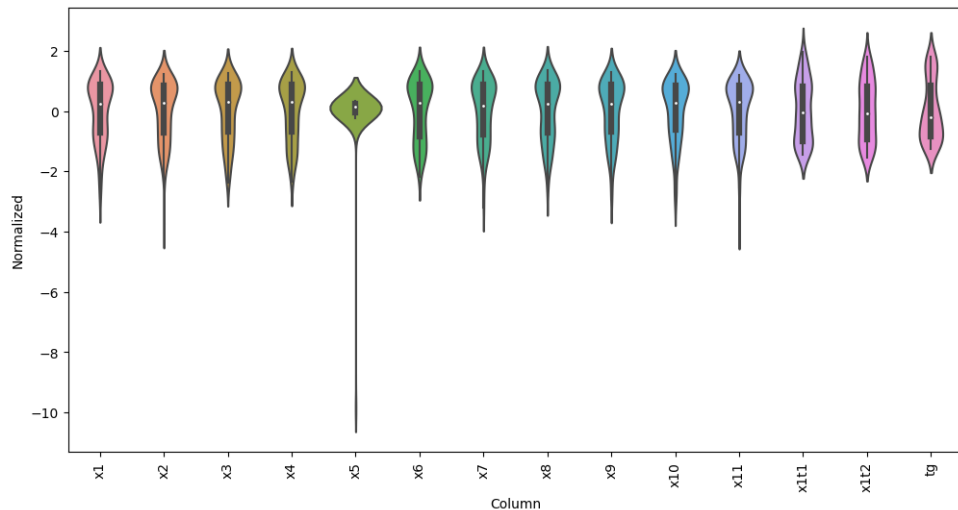
x_train_df = (x_train_df - x_train_mean) / x_train_std
x_val_df = (x_val_df - x_train_mean) / x_train_std
x_test_df = (x_test_df - x_train_mean) / x_train_std
```

```
In [12]: x_test_df.head()
```

```
Out[12]:
```

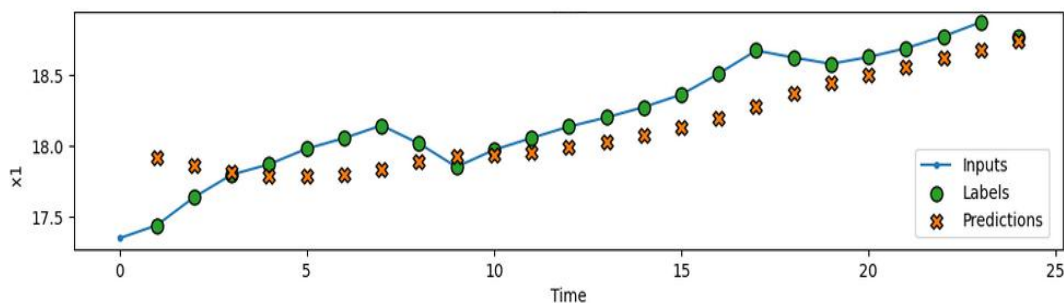
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x1t1	x1t2	tg
131	1.737589	1.571561	1.650943	1.686019	0.390655	1.748862	1.756762	1.785325	1.690430	1.574410	1.546307	3.399847	3.234831	2.970359
132	1.679124	1.523002	1.598156	1.631237	0.380903	1.690522	1.697364	1.724748	1.635049	1.525160	1.498778	3.404623	3.263056	2.983845
133	1.608967	1.464731	1.534812	1.565500	0.369201	1.620516	1.626090	1.652055	1.568593	1.466059	1.441743	3.408443	3.285636	2.994635
134	1.707907	1.546908	1.624144	1.658207	0.385704	1.719244	1.726607	1.754570	1.662314	1.549406	1.522177	3.627390	3.333902	3.024980
135	1.767271	1.596215	1.677743	1.713831	0.395606	1.778480	1.786917	1.816080	1.718546	1.599415	1.570437	3.758758	3.362861	3.043187

34. ábra A kód és a normalizálás eredménye



35. ábra Az eloszlás a normalizálást követően

Ezt követően három részre bontottuk az adatokat: Ebben az esetben 146 különböző adatsort jelent, ahol ennek 70%-a tanítás; 20%-ot kiértékelésre, 10%-át tesztelésre használtunk fel. Ezeknek az adatoknak egy kis részét „warm up-ra” használtuk a tanítás során, a másikat pedig címkéként, hogy jelezze, mennyire jó a modellünk (az ismert adatok nélkül nem tudni, mennyire jó az előrejelzett adat, ezért ismert időértékekre jósoltattuk rá a modellünket, majd ez alapján értékeltük ki, hogy mennyire jó a modellünk).



36. ábra Példa az X1 (X irány első mérés) érték prediktálására

Az így kapott értékek nem tökéletesek, ehhez további betanításra lenne szükség, továbbá több adat gyűjtésére, majd ezek valós adatokkal történő összehasonlítására. Minél több adat áll rendelkezésre annál pontosabb lesz a betanítási folyamat, ezáltal az algoritmus is.

4.4.2. Eredmények és tapasztalatok összefoglalása

A tesztgyártási értékeket és a kísérleteket követően összesen 100 értéket tápláltunk be. A geometriai ellenőrző méréseket a nagyobb pontosság és a SIEMENS ciklustól való függetlenítés érdekében a beépített Renishaw folyamatciklussal végeztem. Az értékeket ebből az adatsomagból mentettük és kiértékeljük. Az értékek mögött rejlő trend megértése után jöttek a következő ciklusok (90) becsült értékei. A neurális hálózat jól működött, a normalizálás után már csak egy váratlan eltérés volt az adatsomagban. A valóság megfelelő leképezése miatt ezt a hibát bennehagytuk és így teszteltük a neurális hálózat képességét.

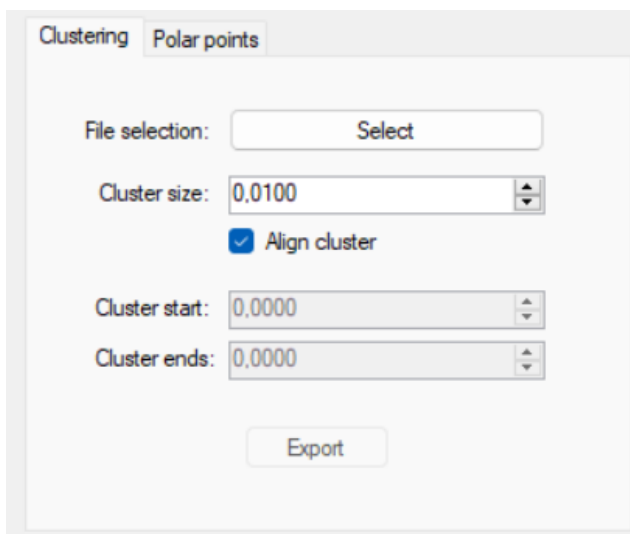
A fejlett statisztikai módszer használatának fő célja a folyamat jobb megértése és a következő ciklus méréseinek előrejelzése volt. Az összetett adatok mélyebb megértése a modern matematikai egyenletek egyik legelőnyösebb tulajdonsága.

Ez a tanulmány azt mutatja, hogy ennek a folyamatértékelésnek a kidolgozása nagyon hasznos a gyártott termékek pontosságának megértéséhez és előrejelzéséhez. A további machine learning módszerek bemenő adatainak sorát bővíthetjük olyan értékekkel, mint például áram, feszültség és ellenőrizhetjük ezek hatását a neurális hálónkra, így jobb rálátásunk lesz a folyamatadatokra.. Ez segít abban, hogy jobban megértsük és bemutassuk a neurális hálózat használatának jelentőségét a gyártási folyamatok hatékonyságának megjelenítésére és fejlesztésére.

Több független adatsomagból történő neurális hálózat fejlesztésével lehetőség nyílik további folyamatadatok feldolgozására, ezáltal prediktálására.

4.5. A ballbar mérések bemutatása

Kifejlesztésre került egy program az adatok feldolgozására, amelynek a fő bemeneteit a Renishaw szoftver által biztosított jegyzőkönyvek adják. A program a széles körben használt .Net környezetben készült, C# programozási nyelvet használva, Windows form elemekkel. A szakirodalomban találhatók példák arra, hogy egyedi szoftvert írjanak az adatok jobb feldolgozása érdekében. Javasolt egyedi szoftver fejlesztése, amely különböző módokon képes kiszűrni a lehetséges hibákat, ezáltal javítva az adatok minőségét [9]. Először is, a program megjeleníti a jelentés fájlból származó adatokat. Hozzá lett adva egy funkció, amely figyelmezteti a felhasználót, ha a fájl sérült vagy olvashatatlan. A felhasználói felület a 2. ábrán látható.



37. ábra Ballbar adatok beolvasására és kiértékelésére.

4.5.1. A program használata

A klaszterezési modul megnyitásakor a klaszter mérete kiválasztható. Ez nagyon jól használható, mivel a kiválasztás alapja lehet a gép standardja, a korábban meghatározott pontosság vagy a ballbar mérési folyamat pontossága is. A további feldolgozás szempontjából ez egy nagyon fontos eszköz, amely a felhasznált adatok alapján működik.

A program elvégzi néhány előzetes számítást, majd a felhasználó által kiválasztott klaszterek számának megfelelően javaslatot tesz a kezdő értékekre.

A program megpróbálja a számot egy ésszerű klaszterre kerekíteni; az adatok minimum és maximum értéke, valamint a felhasználó által előre kiválasztott klaszterek száma alapján. Itt lehetőség van annak kiválasztására is, hogy honnan induljon a klaszterezés; egy alsó és egy felső határ, amelyek lehetnek a kiszámított értékek vagy a fájlban szereplő minimum/maximális értékek. Majd a program kiszámítja a különbséget a két érték között, és hozzáadja azt az alsó határhoz, így létrehozva a klaszter tartományokat.

Miután ezeket az értékeket hozzáadták, már csak az összes értéket kell klaszterbe helyezni, és megszámolni, hogy hány érték található egy klaszterben. A klaszterezést a K közép klaszterezés alapján végzi el. A program egy táblázatot hoz létre, amely tartalmazza az egész adatállományt és annak klaszterének minimum és maximum értékeit.

A második gomb segítségével a poláris koordináták is meghatározhatók. A poláris koordináták trigonometrikus függvények alapján kerülnek kiszámításra.

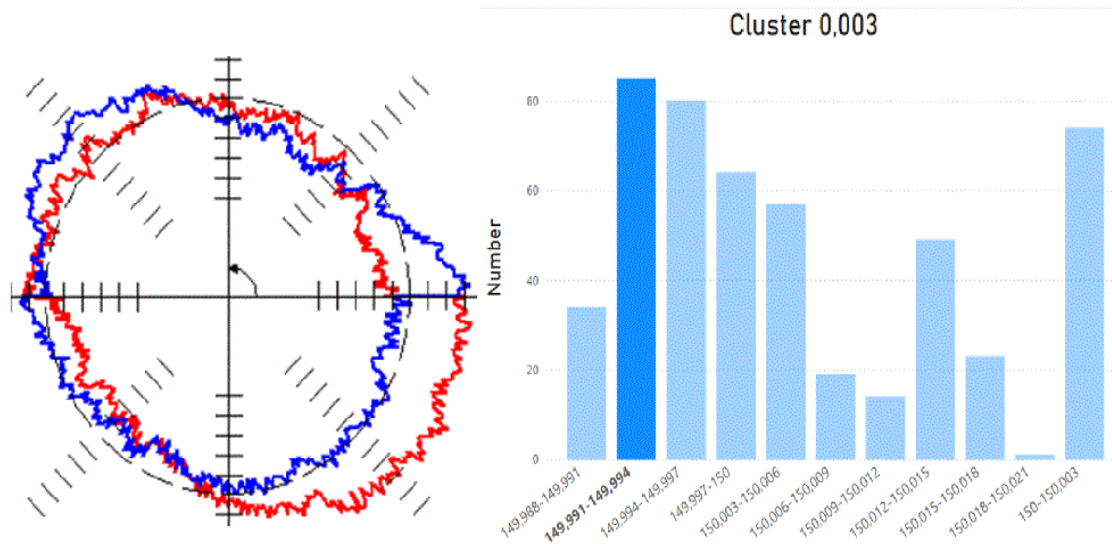
Az információ, amelyet a felhasználó kap, egy háromszög egyik oldala, és nyolc különböző módon kezelhető. A másik két oldal az X és Y lesz, és a szöveget a fájl tartalmazza. A fájl az osztott kör pontos értékeit tartalmazza, de X és Y koordinátákban. A további kutatás során ezt részletesebben bemutatjuk. A megoldás, a modern matematikai háttér alkalmazásával, biztosítja az értékek javításként történő felhasználását és a különböző helyek térképezését a 3-tengelyes gép munkaterületén. Ez a megközelítés segít jobban megérteni a gép teljesítményét, és hozzájárul a hibamentes gyártás eléréséhez.

4.5.2. Kiértékelés a szoftver segítségével, használatának előnyei

A Renishaw szoftverből szimulált géphibák közül az alábbiakat lettek kiválasztva:

Derékszög hiba és kopott tengely hiba, mivel ezek nagyon gyakoriak, valamint Y-tengely egyenességi hiba az X-tengelyen, mert ez nagyon összetett, és könnyen lefedhet más pontatlanságokat is. Minden szimuláció két színű, mivel a szoftver mindkét irányú pályával egyaránt számol.

A bemutatott gép pontossága alapján az értékeket 0,001, 0,003 és 0,005 mm széles tartományokba helyezték. Ezt követően a 0,003 mm széles tartományokkal készült diagram és a két irányú körinterpoláció az alábbi 3. ábrán látható.



38. ábra Renishaw ballbar grafika és az excelben történő további elemzés

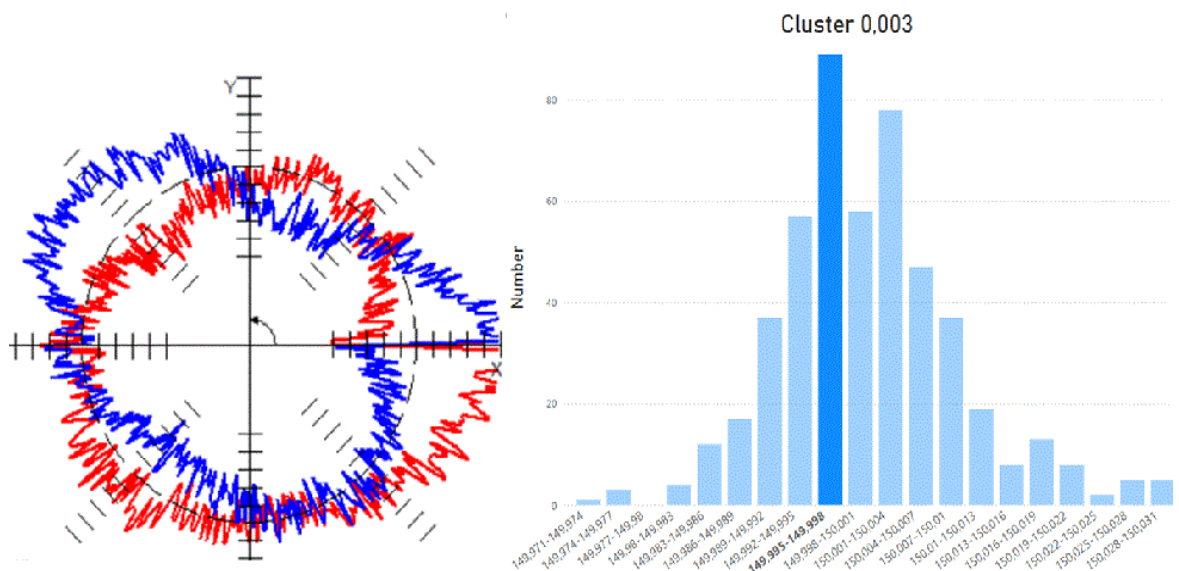
A szimulált hiba típusának főbb eredményei a következők:

- Adatpontok száma: 500 db
 - Legjobb R: 150,0000 mm
 - Legjobb X: 0,0031
 - Legjobb Y: -0,0024.
 - Ezek az egyetlen értékek, amelyek a Renishaw szoftverben szerepelnek.
- Az alábbiak a mi táblázatunkból származnak: Átlag: 150,0005428 mm, Szórás: 0,0077. A következő összehasonlításban az értékeket ugyanazon a listán találhatjuk.

Az eredeti kiértékeléshez viszonyítva, amelyben az szerepelt, hogy a legjobb R=150 mm, a szórás=0,0077, és az átlag értéke 150,0005428 mm, a 0,003 mm szélességű tartományok diagramján látható, hogy a leggyakoribb értékek 149,991 mm és 149,994 mm között mozognak. Nincs eltérés a különböző tartományok szélességei között. Ha összehasonlítjuk őket a 0,005 mm szélességű tartomány diagramjaival, láthatjuk, hogy csupán 0,004 mm különbség van az adatcsomagok legmagasabb értékeinél. A három legnagyobb sűrűségű klaszter 149,991 mm és 150,003 mm között található.

Itt bemutatásra emiatt csak a 0,003 mm széles tartományokkal rendelkező diagram került. A legjobb láthatósággal és használhatósággal a 0,003 mm szélességű diagram rendelkezik.

Az eredeti jelentéshez viszonyítva ez egy átlagos pontosságú értéket mutat, amit a további mentett adatokhoz használhatunk, és jobban tükrözi a gépen történt kopást vagy ütközést. A következő ballbar tesztet a kopott tengely hiba esetén végeztük el.

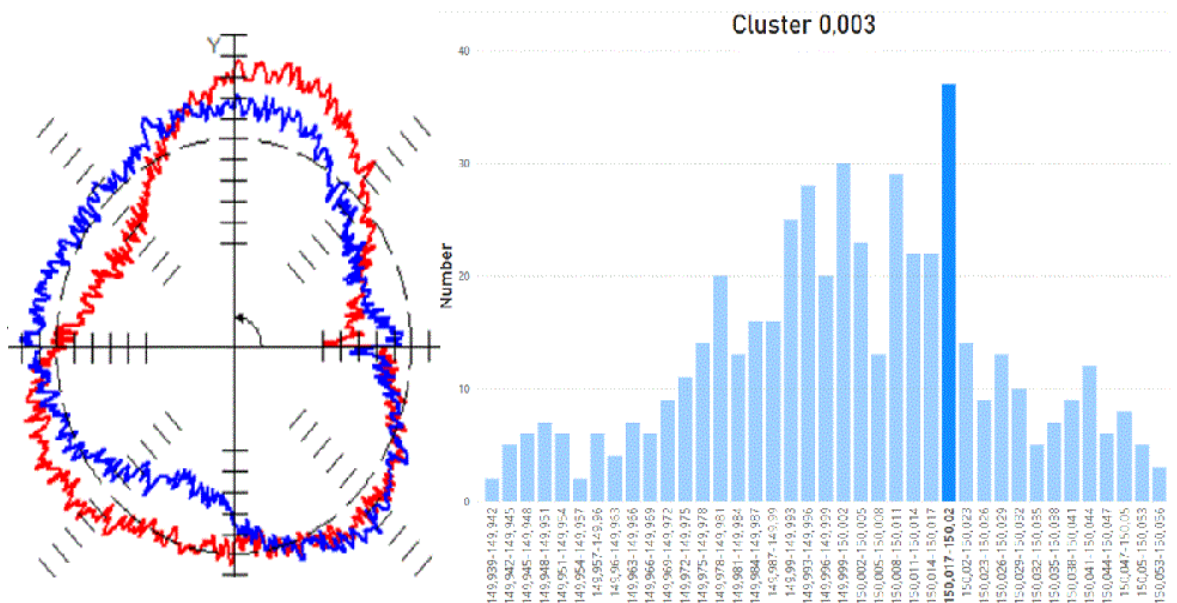


39. ábra Kopott tengely szimulált ballbar mérés

Ahogy a 40. ábra is mutatja, az értékek intenzívebben szóródnak a teoretikus kör körül. Ha ugyanazokat a szélességű tartományokat összehasonlítjuk az előző tesztel, itt jelentősen több oszlopot látunk, de a szórás az előző 0,0077-ről 0,0091-ra változott. Ez azt jelzi számunkra, hogy mennyire fontos egy geometriai eltérést diagram formájában vizsgálni, hogy jobban megértsük az adatok jellemzőit és a teljes kör körüli változásokat. A különböző tartományokat összehasonlítva itt láthatjuk, hogy a 0,003 mm és 0,005 mm szélességű tartományok között kisebb eltérés van, mint az előző adatcsomag esetében. A minimum érték 0,001 mm eltérést mutat, míg a maximális érték 0,003 mm ezen két diagram között. A klaszterek száma majdnem kétszer akkora, mint az előző mérésnél. Ezt a magasabb szórás és a szimulált kopás különböző típusai okozzák. Az ábrákat összehasonlítva a szabványos Renishaw jelentési értékekkel látható, hogy a legjobb X és legjobb Y értékek szinte megegyeznek a minimum és maximum értékek közötti különbséggel a legnagyobb sűrűségű értékeknél. Az átlagos érték megegyezik azzal, amit a 0,005 mm szélességű tartomány diagramja mutatott. Ezen értékek alapján csupán a 0,003 mm szélességű tartomány diagramja kerül bemutatásra.

- □ Átlag: 150,0003742
- □ Szórás: 0,0091015
- □ Adatpontok száma: 500
- □ Legjobb R: 150.0000
- □ Legjobb X: 0,0027
- □ Legjobb Y: -0,0052

A következő ballbar tesztfolyamat az 5. ábrán látható, amelyet az Y-tengely egyenessége az X-tengelyen hiba esetén végeztünk el, ami az egyik legbonyolultabb hiba, amelyet kiválaszthatunk. Az ábra kördiagramja nem tűnik olyan zűrzavarosnak, mint az előző.



40. ábra Y-tengely egyenessége az X-tengelyen hiba

A diagramokon végignézzve az első észrevehető különbség, hogy minden tartomány szélességében több klasztert találunk, mint az előző mérések során. Ez a geometriai hiba következménye a teoretikus kör körül. A Renishaw jelentésben az első két fontos megjegyzés, hogy az átlagérték szinte ugyanaz, mint amit az előző jelentésekben láttunk, azonban a szórás majdnem négyszer nagyobb, mint az első esetben. Ez magyarázza, miért található olyan sok különböző szakasz a diagramokon. A vizualizált értékek vizsgálatának ezen a pontján látható, hogy a mérési eredmények jobb megértése érdekében érdemes lehet megnövelni a tartományok szélességét.

Ezen kívül figyelembe kell venni a vizualizáció fontosságát is, mivel ha csupán a jelentéseket nézzük, akkor ezen három hiba összehasonlításával szinte semmit nem láthatunk.

- Átlag: 150,0005428
- Szórás: 0,024903365
- Adatpontok száma: 500
- Legjobb R: 150.0000
- Legjobb X: -0,0047
- Legjobb Y: 0,0022

	Átlagos radius [mm]	Szórás.	Legpontosabb sugár [mm]	Legpontosabb X érték[mm]	Legpontosabb Y érték[mm]	Csoportok száma
Négyzetesség hiba	150,0005428	0,0077	150	0.0031	-0.0024	11
Kopott tengely hiba	150,0003742	0,009102	150	0.0027	-0.0052	20
Y-tengely egyenessége az X- tengelyen hiba	150,0012376	0,024903	150	-0.0047	0.0022	39

21. táblázat A ballbar szimulált értékek összegzése minden ciklusra vonatkozóan

Az itt bemutatott értékek három különböző gépből származnak, és, amint látható, azok összehasonlítása ebben a formában sokkal egyszerűbb, mint a szabványos .txt fájlokban. Nagyon érdekes, hogy a Legjobb R minden esetben 150 mm, mivel minden gép ezt az értéket éri el, de látható, hogy ez az érték nem igazán hasznos, ha csak a diagramokat vesszük figyelembe. Ha végignéznünk a méréseken, nem találunk jelentős különbséget az "Átlagos sugár értékek" között, ahol a maximális különbség kevesebb mint 1 mikrométer. Ezt a gondolkodásmódot figyelembe véve a szórások különbségeket mutatnak a kopott tengely hiba és az Y tengely egyenessége az X tengely hibája között. Ez azt jelenti, hogy a harmadik szimulált mérés esetében a szórás majdnem háromszor nagyobb. A Renishaw alapú legjobb R és Legjobb X Y értékek között sem találunk jelentős különbségeket.

A Renishaw jegyzőkönyv önállóan nem alkalmas további adatfeldolgozásra, mivel .txt formátumban van, és az értékeket többnyire kinyomtatják és fizikailag tárolják. Ezért egy fejlettebb megoldásra volt szükség az adatcsomag kezelésére. A szoftver .Net környezetben készült, és a Renishaw .txt fájlból dolgozik, az értékeket Excel táblázatban listázva. Az értékek valódiak, és nem az elméleti sugártól való eltérések. A program különböző tartományokat kínál, és az értékeket kartéziai koordinátákká alakítja.

A program lehetővé teszi a klaszterek méretének manuális hozzáadását, figyelembe véve a gép és a ballbar mérési pontosságát. Az X és Y koordináták további karbantartási adatokhoz és CNC marási program korrekciókhoz használhatók. A jövőbeli kutatások célja, hogy a kartéziai koordinátákat feldolgozva automatikus CNC korrekciókat készítsenek, és a folyamatot valós környezetben alkalmazzák a gép pontosságának javítása érdekében.

A kutatás ezen része a ballbar mérési folyamatra összpontosít, bemutatva a 3 tengelyes marógép lézer interferometriai mérését és a ballbar mérések szimulációját. A cél egy kibővített adatfeldolgozási módszer kidolgozása, amely segíti a gép állapotának megértését és támogatja a gyártási programokat. A .Net környezetben fejlesztett program elemzi az adatokat, kezeli a sérült fájlokat, és lehetővé teszi a klaszterek méretének kiválasztását. A tanulmány részletes elemzést és vizualizációt nyújt a gépi hibákról, és hangsúlyozza egy jobb megoldás fejlesztésének fontosságát az adatcsomag kezelésére. A program hozzájárul a gép teljesítményének javításához és a nagy pontosságú megmunkálás eléréséhez.

4.6. A dolgozatban bemutatott folyamatok gyakorlati alkalmazhatósága

A dolgozatban bemutatott folyamatfejlesztési és hatékonyságnövelési gyakorlatok gyakorlatilag minden, a műszaki élet különböző területén tevékeny kis és közép vállalkozás számára hasznosak. A használhatóság mértéke és összetettsége az adott vállalat tevékenysége, gyártási sorozatának nagysága, reakcióképessége, illetve a rövid, közép és hosszútávú terveinek függvénye.

A jelenlegi európai gazdasági környezet pesszimista és zsugorodással számol. Azonban a piac szereplői számára ezek a folyamatok inkább ködösek, mintsem teljesen kilátástalanok. A geopolitikai átrendeződés és a stratégiai iparágok körül tapasztalható intenzív aktivitás előremutat egy hosszabb távon is működőképes stratégiát az európai országok ipari szereplői számára. Manapság a piaci szereplők túlélési stratégiájának elkészítésekor egy kissé elcsépett, azonban a jelenlegi helyzetet tökéletesen reprezentáló mondatot kell szem előtt tartani; „Semmi sem állandó, csak a változás maga”. Az idézett mondat Hérakleitosztól származik, aki a Krisztus előtti 5. században élt és alkotott.

Elgondolkodtató, hogy a mondat leírt formája 2500 éves, viszont egyszerre reményt keltő is, hogy nem egy lehetetlen feladattal kell megküzdenie a társadalmunknak, hanem egy jellemzővel néz szembe. Az európai jólétet és biztonságot, amely a második világháború utáni újjáépítéssel kezdődött, csak kemény munkával és a globalizált világ miatti folyamatos versenyképesség-javítással lehet fenntartani. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a jelenlegi vezetői generáció viszonylag kiszámítható, jó anyagi háttérű környezetben szocializálódott és még nem találta magát szembe olyan komplex kihívással, ami a jelenlegi helyzetet leírja.

A vállalatok megváltozott helyzete:

Kiindulópontnak tekintsünk egy „A” gépgyártó egyedi gyártással foglalkozó KKV-t amely 10 db-nál kevesebb megmunkálógéppel rendelkezik, illetve egy „B” gépgyártó céget, amely -jól reprezentálva az elmúlt években elérhető gyors fejlődést- jelenleg 50 megmunkáló géppel rendelkezik, és mivel kis szériák gyártásából és egyedi gyártásból fejlődött, így még a vevőköre is megvan, illetve a nagy sorozatú gyártásra egyre jobban specializálódik. Gépesítettségében adott termékek gyártására célgépekkel is rendelkezik. A vállalatok életében a rendszerváltást követően nagy kihívást, de közben segítséget is jelentett az ISO 9001 szabvány megjelenése, amely egységesítette a vállalatok minőségügyi rendszereinek fejlettség-értékelését.

Kiemelte az erősségeket, rávilágított a gyengeségekre, segítette a vállalati fejlesztések tervezését és kivitelezését. Ritkán találkozhatunk az alábbi szabvánnyal, viszont a mai kor kihívásainak való megfelelésre nagy segítség lehet. Ez a szabvány az Innovációmenedzsment rendszer ISO 56002 [140]. A szabvány hatékony megismerését az alábbi táblázat segíti, ahol a felépítését összehasonlítom az ISO 9001 szabvánnyal.

1. Szempontok	ISO 9001: Minőségmenedzsment	ISO 56002: Innovációmenedzsment
Cél	Biztosítja a termék/szolgáltatás konstans, előre meghatározott minőségét az ügyfelek igényeinek és a szabályozási követelményeknek való megfeleléssel	Biztosítsa a termék/szolgáltatás állandó minőségét az ügyfelek igényeinek és a szabályozási követelményeknek való megfeleléssel a vállalat belső folyamatainak fejlesztésére való fókusszal.
Szerepkör	Bármely szervezet számára alkalmazható, amelynek célja a működési hatékonyság és az ügyfél-elégedettség és bizalom javítása.	Minden méretű szervezet számára alkalmas, amely az innováció mechanizmusát kívánja beépíteni vállalati kultúrájába és stratégiájába.
Vezetőség	A vezetőség elkötelezettsége kritikus fontosságú a minőségirányítási rendszer működésének sikerességével kapcsolatban. A vezetőknek aktívan részt kell venniük a minőségi célok támogatásában.	A vállalatvezetés kulcsfontosságú szerepet vállal az innovációbarát kultúra bevezetésében és fejlesztésében. A vezetők felelőssége az innováció menedzsment stratégiák meghatározása és felügyelete.
Tervezés	A termék/szolgáltatás minőségét befolyásoló tényezők, kockázatok azonosítása. Minőségtervezés folyamata. Intézkedések tervezése, felügyelete.	Innovációs célok és tervek stratégiai kidolgozása. Az innovációs erőforrások és feladatok összehangolása a szervezeti célokkal.
Támogatás	Erőforrások biztosítása a minőségirányítási rendszer (QMS) bevezetéséhez és működéséhez. Képzés biztosítása az alkalmazottak számára a	Megfelelő erőforrások biztosítása az innovációs tevékenységekhez. Ösztönözze a tudásmegosztást. Megfelelő képzések, platformok, folyamatok támogatása.

	minőséggel kapcsolatos szabványok betartása érdekében.	
Működés	Meghatározzák a minőségi célok elérését szolgáló működési folyamatokat. Figyelemmel kíséri a beszállítók teljesítményét a minőségi bemenetek biztosítása érdekében.	Innovációs fejlesztési folyamatok irányítása az ötlettől a megvalósításig. Együttműködés a fejlesztésben külső partnerekkel. A vezetők agilis menedzsment eszközöket alkalmaznak a váratlan kockázatok és helyzetek kezelésére.
Fejlesztés	A folyamatos fejlesztés a az ügyfélelégedettség és a működési hatékonyság növelése érdekében.	Az innovációs gyakorlatok folyamatos fejlesztésének a mindennapi folyamatokba történő integrálásának előmozdítása. Agilis alkalmazkodás a változó piaci igényekhez.
Alapvető célok	Vevői fókusz	Folyamatmegközelítés

22. Táblázat Szabvány felépítés szerinti áttekintés a jobb összehasonlítás érdekében

Az Innovációmenedzsment rendszer mindkét vállalatnak elengedhetetlen folyamatainak kiértékeléséhez, jobb átláthatóságához. A rendszer további pozitívuma, hogy mérhető, és a dolgozatban bemutatott folyamatok és fejlesztési lehetőségeknek egy szabványos keretrendszert kínál.

4.6.1. Gépsatuban létrejövő deformáció vizsgálatának gyakorlati hasznossága

A korábban bemutatott „A” és „B” vállalat a jelenlegi piaci környezetben egyaránt szembesülni kénytelen a munkaerő fluktuációjával, amelyet sajnos az inflációs kilátások s folyamatok csak tovább mélyítenek. A korábban specialistaként alkalmazott szakemberek jelentős része idős, így nem vált könnyedén munkahelyet, amely egyszerre könnyebbségnek tűnik, azonban globálisan szemlélve nehézséget okoz. Az ilyen képzettségű és tapasztalatú emberek amennyiben elhagyják a céget, vagy nyugdíjba vonulnak, helyettesítésük gyakorlatilag lehetetlen. A tapasztalatuk megőrzése mint vállalati érték elkerülhetetlen. Adott cég innovációmenedzsment céljaiba gyakorlatilag elkerülhetetlen beépíteni, hogy a tudás sztenderdizálása és megőrzése érdekében a „best practise” folyamatok miként őrizhetőek meg. A dolgozatban bemutatott vizsgálat elemei, vagy akár egésze ehhez nyújt segítséget.

A meghúzási nyomaték felügyelete már önmagában is felesleges munkafolyamatoktól és kiesett időtől menti meg a vállalatot, amennyiben az adatcsomag elérhető és jól alkalmazható a kijelölt dolgozó számára. A dolgozatban bemutatott deformációvizsgálat és kiértékelés közösen történhet vállalat és kutatóközpont, vagy szakképzési centrum, egyetem segítségével. Az adatok vállalatirányítási rendszerbe történő feltöltése és egy kijelölt tapasztalt szakember vagy mérnök „supervisor” felügyeletének segítségével hatékonyan javítja a vállalat minőséggel kapcsolatos folyamatait, céljait, illetve az innovációmenedzsment stratégiai lépéseként is beépíthető – megfelelő vezetői támogatás- mellett.

4.6.2. CNC megmunkálógép mérési képességének alkalmazása

A CNC marógépben történő mérések kiértékelése, és azok további felhasználása mindkét bemutatott cég számára előnyös. Fontos kiemelni, hogy a gép vezérlőjében tárolt adatok további módosítás nélkül elérhetőek. Folyamat szinten kell az elérhetőségüket kezelni, fejleszteni. A két cég számára azonban az adatok felhasználásának folyamata a hatékonyság érdekében eltérőnek kell, hogy legyen. Az egyedi, kis sorozatú gyártás esetén a mért értékek akár megmunkálási folyamaton belül felügyeletet igényelnek a szerszámkopás, a befogással kapcsolatos változások miatt. A nagysorozatú gyártások, célgépek alkalmazásakor adott frekvenciát kell meghatározni a mérések elvégzésre, illetve a mérések helyére vonatkozóan. Könnyedén belátható, hogy adott megfogásban történő, ugyanazon szerszámmal elvégzett megmunkálási lépések elvégzésekor optimalizálható a mérések száma, mivel a szerszám gép pontossága a mérések alapján adott területen azonos lesz. Innen következtethető a többi megmunkálás adott függvény szerinti korrekciója. Adatcsomag mentésekor a szerszám, megmunkálási folyamat és alapanyaggal kapcsolatos paramétereket is menteni kell a megfelelő kiértékelések előkészítése érdekében. Az így elérhető hatékonyságnövekedés csekély erőforrásigénnyel rendelkezik, azonban jó összehasonlítási alapot képez a vállalat hosszútávú stratégiájának kialakításakor, a folyamatos fejlesztés biztosításához. Az adatok a karbantartástervezés számára is hasznosak, és pontos képet nyújtanak.

4.6.3. 3D mérés technika integrálhatóságának bemutatása

A 3D mérés technika itt bemutatott alkalmazása egyedi, kis és közepes sorozatoknál, prototípus készítésnél, illetve „reverse engineering” vagyis visszafelé történő

terméktervezésnél különösen előnyös. Emiatt nem mutatom be külön külön a korábban tárgyalt két vállalatnál történő alkalmazhatóságát, hanem egyként tárgyalom őket. A bemutatott eredményekből kiindulva jól kiegészíti a hagyományos tolómérővel és mikrométerrel végzett méréseket. A technológia sajátja, hogy mentett adatokból dolgozik, ezáltal azonnal rendelkezésre áll az adatsomag további, vagy később történő felhasználásra is. A technológia további előnye, hogy érintésmentes technológia, egy szkennelési lépésből kapott adatsomagot bármennyiszer felhasználhatunk és kiértékelhetünk. Alkalmazását egyedi megfogóknál, rögzítő és összetett geometriájú elemeknél egyaránt jól alkalmazhatjuk. Gyártás, illetve fejlesztési folyamatba történő integrálhatósága a fejlesztési projekteknél és az agilis termékfejlesztés folyamatoknál kiemelkedő hasznossággal bír.

4.6.4. Machine learning folyamatok alkalmazása

A 2020-as évek modernitását és fejlettségét egyik legjobban kifejező kijelentése az „AI”, „ML”, avagy a mesterséges intelligencia, gépi tanulás stb. Hasonlóan az Ipar 4.0 kifejezéshez való viszonyuláshoz a mesterséges intelligencia is sokféle véleményt, konfliktust okoz. A mesterséges intelligencia kevésbé felkapott neve azonban nem más, mint fejlett statisztika, amely különböző algoritmusok segítségével értelmezi a hozzá eljuttatott adatokat. A modern gyártásfolyamatok különösen hasznos eleme lehet a mesterséges intelligencia által biztosított eszközök alkalmazása. Mivel a téma intenzíven fejlődik és jelenleg szinte megállíthatatlanul szerteágazó, így az alkalmazhatóság tárgyalásakor a dolgozatban bemutatott folyamatra fókuszálok. Önmagában a bemutatott módszer mindkét méretű KKV számára alkalmazható alternatíva.

Azonban a módszer jellemzői miatt ketté kell választanunk a lehetséges alkalmazás bemutatását. A „B” cég esetén, mivel azonos alkatrészt készítenek közepes, vagy nagy sorozatban az elemzési lehetőség hasznossága nem kérdéses. Könnyen kivitelezhető, az adatok precízen gyűjthetőek, majd további optimalizálásra és a folyamat költségösszetevőinek meghatározására használhatóak. Az „A” cég mivel jellemzően egyedi és kis sorozatokat készít, így a módszer hasznossága nem magától értetődő.

A szerszámterhelések összehasonlíthatósága miatt külön kell választani a felvett adatokat megmunkálási paraméterek és anyagtulajdonságok miatt is. Az adatfelvétel így bonyolultabb, és az értékek komplexebb tárolást is kívánnak. Az adatelvételt az említett okok miatt optimalizálni kell. Célszerű a szerszámélettartam szempontjából kritikus megmunkálásokra és

szerszámokra fókuszálni, ezáltal elkerülni a felesleges terhelést a dolgozók és az adatgyűjtő- és tároló rendszer számára. Az adatok kiértékelésével lehetőség nyílik stratégiai döntések támogatására szerszámbeszerzésekkor és egy pontosabb árazási és megtérülési számítások elvégzésére. Az így nyert adatok az egyes tapasztalt dolgozók „best practice” megoldásait is számszerűsíthetik. Fontos kiemelni, hogy amikor ember dolgozik együtt ilyen rendszerrel, sokszor olyan adatok, mozzanatok is kiértékelésre kerülnek, amelyek olyan szinten automatikusak, hogy az egyes dolgozó nincs is feltétlenül tisztában a folyamat értékteremtő lépéseivel, azonban másik dolgozó azonos munkafolyamat elvégzését nem feltétlenül tudja ugyanígy elvégezni. A folyamatokra való fókuszálás az adathasználat korábban bemutatott Innovációmenedzsment rendszer elengedhetetlen eleme. Összefoglalva alkalmas a rendszer a folyamatok részletesebb elemzésére, a statisztikai módszer segítségével olyan mélységű elemzést tesz lehetővé, amit a hagyományos módszerek nem, vagy csak részben tettek lehetővé.

4.6.5. A ballbar mérések bemutatása

A ballbar mint a szerszám gép verifikációjakor alkalmazott mérési folyamat közvetetten járul hozzá a vállalatok értékteremtő folyamataihoz. Mivel a szerszám gép pontosságához és annak állapotához köthető információval szolgál, így a hasznosság tárgyalásakor a két vállalat között nem kell különbséget tennünk. A kapott értékek mélyebb elemzésekor a szerszám gép állapotát pontosabban ismerhetjük meg, ezáltal kimutathatunk az adott gyártástervezés számára elengedhetetlen pontosságkülönbséggel rendelkező területeket a szerszám gép megmunkálási terében. A gépeket így rangsorolhatjuk, precízebb költség összetevőket kapunk, és stratégiai adatokkal szolgálunk a menedzsment számára a közép és hosszú távú döntésekhez. Hosszú távú stratégiakor, amennyiben rendellenes működés lép fel, a mérési frekvencia, vagy felbontás módosítható a stratégiának megfelelően. Mivel független rendszerként alkalmazzák, így nem befolyásolja a gépi pontatlanság az adatokat. A karbantartási modul számára is hasznosak az így gyűjtött értékek, illetve a termelési tervezés számára mint gépképesség adatok.

4.7. Tézispontok

- 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 végeselemes 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.

D. Ledenyák, T. Rosta, H. Hargitai; Novel technique for reducing geometrical inaccuracies of clamped workpiece during machining: A hybrid method ;The 7th International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (MSAM 2024) ;Advances in Transdisciplinary Engineering by IOS Press.

- 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.

D. Ledenyák, T. Rosta; Modern Measurement methods introduced in I4.0 manufacturing systems; Műszaki Tudományos Közlemények 17. (2022) xx–yy. <https://doi.org/10.33894/mtk-2022.17.xx>

- 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 adatcsomagok, 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.

D. Ledenyák; INVESTIGATE AND IMPROVE THE ACCURACY OF 3D PRINTING IN I4.0 ENVIRONMENT, Tavaszi Szél Konferencia, Pécs 2022

- 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.

D. Ledenyák, T. Rosta; INVESTIGATION THE MILLING ACCURACY WITH I4.0 COMPATIBLE PROCESSES AND METHOD, December 2022, Műszaki Tudományos Közlemények 17(1):42-45 DOI: 10.33894/mtk-2022.17.09 License CC BY-NC-ND 4.0

- 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.

D. Ledenyák, T. Rosta, M. Andó; Improve the practical usability of Ballbar machine tool verification, 10th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering Advances in Science and Technology Vol. 165, (ISCAME) 7-9 November 2024

5. Összefoglalás

Gépsatuban létrejövő deformáció vizsgálatával kapcsolatban a kutatásom kezdeti szakaszához kötődően megállapításra került, hogy a munkadarab gépsatuba történő megfogásakor végzett mérések során figyelembe kell venni a munkadarab deformációja mellett a satupofák deformáció és helyzetváltozását is. Az eredmények fejezetben részletezett ábrán, a munkadarab deformációja az egész felületen lineáris, és csak 100 Nm nyomatóknál figyelhető meg eltérés a satu pofája és a munkadarab között. Ez a jelenség normális, mivel a mozgó és stabil pofa eltérő hatást gyakorol a munkadarabra a szorítás során. Az esetlegesen megjelenő véletlenszerű csúcsértékek állandóak, és egy felületi hibából erednek, amely az egész vizsgálat során jelen van. Amennyiben ezeket az adatokat fejlett statisztikai modellek alapjául kívánjuk használni, a csúcsértékeket el kell távolítani az adathalmazból. Ugyanakkor ezek az értékek felhasználhatók a FEM szimuláció és a valós deformációk összehasonlítására.

A grafikonok jó alapot biztosítanak a szimulált értékek összehasonlításával, hiszen a terhelés nélküli állapotban meghatározható a kezdeti síklapúság, mellyel kompenzálhatók a mérési eredmények. A kompenzált értékekkel már közvetlenül összehasonlítható a szimuláció során kapott érték, ahol elméletileg tökéletes síkot alkalmaztam.

A 2. táblázatban bemutatott CMM-mérések eredményei nemcsak a munkadarabok síklapúságát befolyásoló konvexitást mutatják, hanem a Z tengely pozitív irányában bekövetkező eltolódás jelenlétét is, amelyet külön elemzés tárgyává kell tenni. A szimuláció eredményei, szintén a 2. táblázatban, kizárólag a felület konvexitását mutatják, amely a szorítási nyomaték munkadarabra gyakorolt síklapúsági hatását határozza meg. A mért és FEM-eredmények összehasonlításából jelentős hasonlóság mutatkozott, amely a szimulált és mért adatok közötti egyezést igazolja.

A FEM-analízis eredményei azt mutatják, hogy a munkadarab deformációja teljes mértékben állandó és szimmetrikus, nincs különbség a mozgó és stabil satu pofa hatása között. A modell egy ideális modellt feltételez, amely nem veszi figyelembe a satu valós működését. Ez a megközelítés tudatos döntésen alapult, mivel eltérések csak nagyobb szorítási nyomatékoknál jelentkeztek, ahol a munkadarab olyan mértékű deformációt érhetett el, amely már tűréshatáron kívüli eltérést okozhat. Itt már a satu menetes orsója egy sugár értéket vesz fel.

Kapcsolódó következtetéseket vonhatóak le az eredmények összehasonlítása során Schoppe E. és Vogel E. tanulmányával, amelyben a megmunkálási erők által okozott síklapúság-változásokat szimulálták, megfigyelték, hogy a mért eredmények és a FEM szimulációs eredmények között szinte állandó eltérés volt, amit lineárisnak minősítettek. Ez azt jelenti, hogy a mért és szimulált adatok közötti különbség egyenletesen változott a terhelés növekedésével. Hasonlóan, a jelen tanulmányban is lineáris összefüggést figyeltünk meg a mért és a FEM eredmények között, ami arra utal, hogy a Z irányú eltolódás egy állandó értékkel változik.

Ez a megfigyelés fontos, mert azt jelzi, hogy a szimulációk és a valós mérések közötti eltérések előre jelezhetők és kompenzálhatók. A lineáris eltérés azt sugallja, hogy a szimulációk pontosan modellezik a valós deformációkat, és a mért adatok alapján finomhangolhatók a szimulációs paraméterek. Ez lehetővé teszi a szimulációk megbízhatóságának növelését és a valós megmunkálási folyamatok optimalizálását.

Továbbá, a Z irányú eltolódás állandó értékkel történő változása azt jelenti, hogy a munkadarab deformációja egyenletesen oszlik el a felületen, ami megkönnyíti a kompenzációs algoritmusok alkalmazását. Ez különösen fontos a precíziós megmunkálási folyamatokban, ahol a munkadarab síklapúságának fenntartása kritikus jelentőségű.

Összességében, a Schoppe E. és Vogel E. tanulmányával való összehasonlítás megerősíti a jelen kutatás eredményeinek érvényességét, és rávilágít a szimulációk és valós mérések közötti összhang fontosságára a megmunkálási folyamatok optimalizálásában.

A 3 tengelyes CNC megmunkológépen történt kutatásokkal kapcsolatosan a mérési értékek megfelelő kezeléséhez és felhasználásához elengedhetetlen az adatok optimális feldolgozása. A rendkívül összetett műszaki alkatrészek gyártása, amelyek számos specifikációval rendelkeznek, megköveteli a vállalatoktól, hogy gyors ellenőrző eszközökkel rendelkezzenek a megfelelőségi mérésekhez és vizsgálatokhoz. Ebben az összefüggésben a mérés technika kulcsfontosságú szerepet játszik az innovációs és fejlesztési folyamatok, valamint a gyártás támogatásában.

A metrológia megfelelő alkalmazása és a mérőszámok helyes felhasználása lehetővé teszi a technológiai fejlődés nyomon követését az Ipar 4.0 elveivel összhangban, biztosítva a gyártási folyamat megbízhatóságát és a műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségét.

Ennek a folyamatos fejlődésnek köszönhetően a vállalatok egyre összetettebb mérési eszközöket igényelnek, amelyek képesek biztosítani a mérési funkciók helyes elvégzését. A műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségének biztosításának növekvő igénye koordináta mérőgépekkel történő ellenőrzéssel teljesíthető. Ez a technológia támogatja a gyors ellenőrzést, és nagy mennyiségű adat előállítására képes, javítva a gyártási folyamattal való interakciót a megfelelőség garantálása érdekében.

Az újonnan kalibrált marógépbe integrált mérőrendszer pontossága könnyen megfelel a gyártó által megadott tűrésmezőknek. A tapasztalatok alapján a mérés jellemzően gyors, és a kapott adatok a MES (Manufacturing Execution System) rendszer segítségével könnyen továbbíthatók és tárolhatók. Ez lehetővé teszi a gyártási folyamat valós idejű monitorozását és a minőségbiztosítási követelmények betartását.

A munkadarabok gyártás utáni mérése az egyik legelterjedtebb, mégis legtöbbet vitatott terület a minőségbiztosítás és a termékmegfelelőség szempontjából. A legegyszerűbb példa a sokféle méret és tűrés alkalmazása, majd az ezekre mutatózó valós igény, amely gyakran csak a termék összeszerelése során, vagy a használatból származó adatok alapján módosul. A szükségtelenül szűk tűréstartomány gyakran megsokszorozza az adott megmunkálás költségeit, nem beszélve a szükségtelen környezetterhelésről.

Következtetések vonhatóak le, a tapasztalatok szerint a kutatásban használt CNC szerszámgép integrált munkadarabmérő rendszere a gyártó által meghatározott tűréstartománynál lényegesen szűkebb tűréssel képes méréseket végezni. A CMM (Coordinate Measuring Machine) mérőgép a CNC megmunkálógép kiváló felügyeleti eszköze, mivel a mérési folyamat szinte azonos lehet. Ennek alapján könnyen integrálható és feldolgozható adatokat kapunk a termelési rendszerünk számára.

A megmunkálás során a szerszámkopás jelensége jobban követhető és kezelhető a rendszer segítségével. A rendszert koordinátamérő géppel ellenőrizve, majd az így kapott adatok alapján beállítva további pontosság-növekedés érhető el. Viszont ez csak a megmunkálógép előre asztalának az előre meghatározott területén biztosítható.

3D nyomtatott darabon történő felületmérési környezetből származó eredmények szerint az összeállítás alkalmas lehet az MSZ ISO 2768-1:1991 szabvány c pontossági osztályába tartozó alkatrészek automatizált ellenőrzésére, továbbá ebben az esetben a tolómérő kiváltására. A mért eredmények különbségei a pontfelhők egymásra helyezésével ellenőrzőként is használhatók. Pontosabb mérés lehetséges jobb szoftveres háttérrel és fejlettebb erőforrásokkal, továbbá a precizitást nagyban befolyásolja a kiinduláskori beállítás és az iterációk száma is.

A 3D szkennerek nagy előnye a koordináta mérőgéppel szemben, hogy nem kell új mérést végeznünk egy új méret leolvasásához, mivel a teljes modell kiértékelhető. Anyagi szempontok alapján is kedvezőbb választást jelent, mivel a 3D szkennerek könnyen telepíthető és mobilis, ami további előnyöket biztosít.

Kutatásom alapján további célom a gyártás előtti, adott körülményeknek megfelelő, illetve gyártás közbeni korrekció az adatkommunikációs lehetőségek és az általam készített adatsorok alapján. Ez magában foglalja a felületi pontatlanságok változásának megértését a 3D nyomtatás kismértékben változó körülményeinek esetében. Különösen a termékek belső kitöltési mintáinak méretpontosságra gyakorolt hatását lehet jól vizsgálni.

A felületi képsorok összehasonlítása a gép paramétereinek a használat során történő megváltozásának értékeléséhez is hasznos adatot nyújt. Ez lehetővé teszi a gyártási folyamatok finomhangolását és a termékek minőségének javítását. Ipari felhasználásban egy 3D szkennerek közepes és kis kategóriájú sorozatokhoz használható, ami rugalmas és költséghatékony megoldást kínál a gyártási folyamatok ellenőrzésére és optimalizálására.

Adatfúzióval kapcsolatos mérési környezetből származó értékeket és a kísérleteket követően összesen 100 értéket tápláltunk be a rendszerbe. A geometriai ellenőrző méréseket a nagyobb pontosság és a SIEMENS ciklustól való függetlenítés érdekében a beépített Renishaw folyamatciklussal végeztem. Az értékeket ebből az adatsomagból mentettük és kiértékeljük.

Az értékek mögött rejlő trend megértése után jöttek a következő ciklusok (90) becsült értékei. A neurális hálózat jól működött, és a normalizálás után már csak egy váratlan eltérés volt az adatsomagban. A valóság megfelelő leképezése miatt ezt a hibát benne hagytuk, és így teszteltük a neurális hálózat képességét.

A fejlett statisztikai módszer használatának fő célja a folyamat jobb megértése és a következő ciklus méréseinek előrejelzése volt. Az összetett adatok mélyebb megértése a modern matematikai egyenletek egyik legelőnyösebb tulajdonsága. Ez a tanulmány azt mutatja, hogy ennek a folyamatértékelésnek a kidolgozása nagyon hasznos a gyártott termékek pontosságának megértéséhez és előrejelzéséhez.

A további machine learning módszerek bemenő adatainak sorát bővíthetjük olyan értékekkel, mint például áram, feszültség, és ellenőrizhetjük ezek hatását a neurális hálónkra. Így jobb rálátásunk lesz a folyamatadatokra. Ez segít abban, hogy jobban megértsük és bemutassuk a neurális hálózat használatának jelentőségét a gyártási folyamatok hatékonyságának megjelenítésére és fejlesztésére. Több független adatsomagból történő neurális hálózat fejlesztésével lehetőség nyílik további folyamatadatok feldolgozására, ezáltal prediktálására.

Ballbar méréssel kapcsolatos háttérkörnyezetben a Renishaw jelentés önállóan nem alkalmas további adatfeldolgozásra, mivel .txt formátumban van, ahol a különbségeket minden egyes fokozat lépésre vonatkozóan rögzítik. Ezeket az értékeket többnyire kinyomtatják és a gép mellett fizikailag tárolják. Ez volt az a kiinduló pont, hogy jobb és fejlettebb megoldást találjunk az értékes adatsomag kezelésére.

A jobb működés érdekében a szoftver .Net környezetben készült, amely a Renishaw .txt fájlból dolgozik. Az értékeket Excel táblázatban listázza, hogy könnyebben és jobban kezelhető legyen az adatsomag. Az itt szereplő értékek a valódi értékek, és nem a Renishaw jelentésben szereplő elméleti sugártól való eltérések. A programban különböző tartományok választhatók, és az értékek polaritás helyett trigonometrikus transzformációval átalakíthatók kartéziai koordinátákká is.

A programban manuálisan megadhatóak a klaszterek méretei, ami nagyon hasznos lehetőség, mert ezen tartományok alapján figyelembe vehetjük a gép pontosságát és a ballbar mérési

pontosságot is. Egy adatsomag több különböző tartományban használható, hogy a feldolgozást jobb formába öntsük. Az X és Y koordináta rendszerbe átalakított értékek felhasználhatók további karbantartási adatokhoz és CNC marási program korrekciókhoz is.

A jövőbeli kutatások során a kartéziai koordinátákat dolgozzák fel annak érdekében, hogy adatsomagot és programot készítsenek a CNC korrekciók automatikus figyelembevételére. A jövőben a teljesen bemutatott folyamatot valós környezetben alkalmazzák, hogy jobban tükrözzék a gép központ pontosságát.

A Ballbar mérési folyamatot követve, bemutatásra kerül a 3 tengelyes marógép lézer interferometriai mérései, és szimulálásra kerülnek a Ballbar mérések a Renishaw szoftver használatával. A lézer interferometriai mérés biztosítja a magasabb pontosságot, míg a Ballbar mérés a gép állapotának áttekintésére szolgál.

Kidolgozásra kerül egy kibővített adatfeldolgozási módszer, amely jobban segíti a gép állapotának megértését, és ezeket az értékeket támogatásként használja a gyártási programokhoz. A modern matematikai háttér alkalmazásával a megoldás biztosítja, hogy az értékek korrigálásként és különböző helyek térképezésére használhatók a 3 tengelyes gép munkahelyén. Ez a megközelítés segít a gép teljesítményének jobb megértésében, és hozzájárul a nulla hibás gyártás eléréséhez.

Fejlesztésre kerül egy program .Net környezetben, C# programozási nyelv használatával, amely feldolgozza az adatokat a jelentésekből. A program elemzi az adatokat a jelentés fájlból, és tartalmaz olyan funkciókat, amelyek a sérült vagy olvashatatlan fájlok kezelésére szolgálnak. Lehetővé teszi a klaszterek méretének kiválasztását a gép alapértelmezett vagy előzőleg meghatározott pontossága alapján, és előszámításokat végez, hogy kezdő értékeket kínáljon a felhasználónak.

Bemutatásra kerülnek a szimulált gépi hibák a Renishaw szoftverrel, beleértve a szögelési hibát, a kopott tengely hibát és az Y tengely egyenességét az X tengely hibájánál. Részletes elemzést és vizualizációt nyújtva ezen hibákra, összehasonlítva az értékeket különböző klaszterek méretei és tartományok alapján.

Összehasonlításra kerülnek a ballbar szimulált értékek minden ciklusra vonatkozóan, kiemelve az átlagos sugár, szórás és a csoportok számának különbségeit minden hiba típus esetén.

Összességében a vizsgálat megállapítja, hogy a Renishaw jelentés önállóan nem alkalmas további adatfeldolgozásra, és hangsúlyozza egy jobb megoldás fejlesztésének fontosságát az értékes adatsomag kezelésére. A .Net környezetben kifejlesztett program egy fejlettebb és felhasználóbarátabb módot kínál az adatok feldolgozására és elemzésére, végső soron hozzájárulva a gép teljesítményének javításához és a nagy pontosságú megmunkálás eléréséhez.

6. Összefoglalás (Summary in English)

Regarding the investigation of deformation in a machine vise, it was established in the initial phase of my research that during measurements taken when clamping the workpiece in the machine vise, the deformation and positional changes of the vise jaws must also be considered in addition to the deformation of the workpiece. The figure detailed in the results section shows that the deformation of the workpiece is linear across the entire surface, and a deviation between the vise jaw and the workpiece is only observed at 100 Nm torque. This phenomenon is normal, as the moving and stationary jaws exert different effects on the workpiece during clamping. Any random peak values that may appear are constant and result from a surface defect present throughout the examination. If these data are to be used as the basis for advanced statistical models, the peak values must be removed from the dataset. However, these values can be used to compare FEM simulations and actual deformations.

The graphs provide a good basis for comparing simulated values, as the initial flatness can be determined in an unloaded state, which can be used to compensate for the measurement results. With the compensated values, the values obtained during the simulation, where a theoretically perfect plane was applied, can be directly compared.

The results of the CMM measurements presented in Table 2 not only show the convexity affecting the flatness of the workpieces but also the presence of a shift in the positive direction of the Z-axis, which must be analyzed separately. The simulation results, also in Table 2, show only the convexity of the surface, which determines the flatness effect of the clamping torque on the workpiece. A significant similarity was observed from the comparison of the measured and FEM results, confirming the agreement between the simulated and measured data.

The results of the FEM analysis show that the deformation of the workpiece is completely constant and symmetrical, with no difference between the effects of the moving and stationary vise jaws. The model assumes an ideal model that does not take into account the actual operation of the vise. This approach was based on a conscious decision, as deviations only occurred at higher clamping torques, where the workpiece could reach a level of deformation that could cause out-of-tolerance deviations. Here, the threaded spindle of the vise takes on a radial value.

Related conclusions can be drawn from the comparison of the results with the study by Schoppe E. and Vogel E., in which they simulated the flatness changes caused by machining forces and observed that there was an almost constant deviation between the measured results and the FEM simulation results, which they classified as linear. This means that the difference between the measured and simulated data changed uniformly with the increase in load. Similarly, in the present study, a linear relationship was observed between the measured and FEM results, indicating that the Z-axis shift changes with a constant value.

This observation is important because it indicates that the deviations between simulations and actual measurements can be predicted and compensated for. The linear deviation suggests that the simulations accurately model the actual deformations and that the simulation parameters can be fine-tuned based on the measured data. This allows for increased reliability of the simulations and optimization of actual machining processes.

Furthermore, the constant value change of the Z-axis shift means that the deformation of the workpiece is evenly distributed across the surface, facilitating the application of compensation algorithms. This is particularly important in precision machining processes, where maintaining the flatness of the workpiece is of critical importance.

Overall, the comparison with the study by Schoppe E. and Vogel E. confirms the validity of the present research results and highlights the importance of the alignment between simulations and actual measurements in optimizing machining processes.

7. Irodalomjegyzék

1. <https://www.bbc.com/news/business-38793253> 2025.01.03.
2. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230426-2> 2025.01.03.
3. A. Edmunds, A. Morris; The problem of information overload in business organisations: a review of the literature; International Journal of Information Management Volume 20, Issue 1, February 2000, Pages 17-28
4. M. R. Sessa, A. Russo, F. Sica; Opinion paper on green deal for the urban regeneration of industrial brownfield land in Europe; Land Use Policy Volume 119, August 2022, 106198
5. L. Naciri, Z. Mouhib, M. Gallab; Lean and industry 4.0: A leading harmony; Procedia Computer Science January 2022 200(2):394-406
6. <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution> 2025.01.03.
7. https://nat2012.nkp.hu/tankonyv/tortenelem_10/lecke_03_028 2025.01.03.
8. https://mersz.hu/dokumentum/vitort_500/ 2024.01.03.
9. R. Lundén, B. Paulsson; 1 - Introduction to wheel–rail interface research; Wheel–Rail Interface Handbook, 2009, Pages 3-33
10. J. Cutler, Cl. and Chr. Morris; Dictionary of Energy (Second Edition) 2015, Pages 217-246
11. <https://www.sztnh.gov.hu/hu/magyar-feltalalok-es-talalmanyai/mozgokepek-a-magyar-technika-tortenetebol/blathy-otto-titusz-der-0> 2025.01.03.
12. Howard F. Marx; Unlocking the secrets of the first airplane to fly: the Wright Flyer Project story, [Technology in Society](#), [Volume 23, Issue 1](#), January 2001, Pages 1-9
13. M. Leone, N. Robotti; Guglielmo Marconi, Augusto Righi and the invention of wireless telegraphy, The European Physical Journal H, Volume 46, 2021, article number 16
14. M. B. Chadwick; The Manhattan Project Nuclear Science and Technology Developments at Los Alamos: A Special Issue of Nuclear Technology. *Nuclear Technology*, 2021, 207(sup1), iii–viii.
15. N. Metropolis, J. Howlett, G-C. ROTA; A History of Computing in the Twentieth Century, Academic Press, 1980, Pages 525-539.

16. E. R. Alphonsus, M. O. Abdullah; A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 60, July 2016, Pages 1185-1205
17. P. B. Ananth, N. Abhiram, K. H. Krishna, M.S. Nisha; Synthesis of radar absorption material for stealth application, *Materialstoday: Proceedings*, Volume 47, Part 14, 2021, Pages 4872-4878
18. T. Weilkiens, C. Weiss, A. Grass; Chapter 7 – Frameworks, *OCEB Certification Guide, Business Process Management - Fundamental Level*, 2011, Pages 123-140
19. K. Schwab; *The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond* 2016, <https://www.weforum.org/stories/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/> 2025.01.03.
20. S. Munirathinam; Chapter Six - Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT), *Advances in Computers* Volume 117, Issue 1, 2020, Pages 129-164
21. R. Ashima, A. Haleem, M. Javaid, S. Rab; Understanding the role and capabilities of Internet of Things-enabled Additive Manufacturing through its application areas, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 5, Issue 3, July 2022, Pages 137-142
22. O. Kolade, A. Owoseni; Employment 5.0: The work of the future and the future of work [Technology in Society Volume 71](#), November 2022, 102086
23. J. J. Ferreira, J. M. Lopes, S. Gomes, H. G. Rammal; [Journal of Cleaner Production, Volume 404](#), 10 June 2023, 136841
24. T. N. H. Albers; The prelude and global impact of the Great Depression: Evidence from a new macroeconomic dataset, [Explorations in Economic History Volume 70](#), October 2018, Pages 150-163
25. S. Kalpakjian, S. R Schmid; *Manufacturing engineering and technology* 5th ed. 2006, Prentice Hall, p. 1192, ISBN 978-7-302-12535-8.
26. W. H. Cubberly, R. Bakerjian; *Tool and Manufacturing Engineers Handbook Desk Edition*, 1989, Pages 1-2

27. P. Helo, M. Suorsa, Y. Hao, P. Anussornnitisarn; Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing, *Computers in Industry*, Volume 65, Issue 4, May 2014, Pages 646-656
28. Sz. Jaskó, A. Skrop, T. Holczinger, T. Chován, J. Abonyi; Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools, [Computers in Industry](#), [Volume 123](#), December 2020, 103300
29. PwC (2021): Csúcs a digitális forradalom, elérhető: <https://www.pwc.com/hu/hu>, (olvasva: 2025.01.03.)
30. Dr. G. Husi ; Ipar 4.0, Debreceni Egyetem Műszaki Kar https://www.researchgate.net/publication/301607839_Industry_40_Hungarian elérhető 2025.01.03.
31. M. Bookjans, A. Weckenmann; Virtual Quality Management–Validation of measurement systems by the use of simulation technologies, *Physics Procedia* Volume 5, Part B, 2010, Pages 745-752
32. G. J. [Oyewole](#), G. A. [Thopil](#); Data clustering: application and trends, *Artif Intell Rev* 56, 2023 Pages 6439–6475
33. S. Wang, [J. Wan](#), D. Zhang, D. Li, C. Zhang; Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination, [Computer Networks](#), [Volume 101](#), 4 June 2016, Pages 158-168
34. Z. Zhu, X. Xu; User-centered information provision of Cyber-Physical Machine Tools, *Procedia CIRP*, Vol. 93, 2020 Pages.1546-1551
35. R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S. T. Newman; Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review, [Engineering](#), [Volume 3, Issue 5](#), 2017, Pages 616-630
36. C.F. Cheung, K.M. Lee, P. Zheng, W.B. Lee; Digital Manufacturing Systems. In: Nof, S.Y. (eds) *Springer Handbook of Automation*. Springer Handbooks. Springer, Cham., 2023, pp 805–827
37. M. Pérez-Lara, J.A. Saucedo-Martínez, J.A. Marmolejo-Saucedo; Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0. *Wireless Netw* 26, 2020, pages 4767–4775

38. N. C. Maideen, S. Sahudin, N. H. Mohd Yahya and A. O. Norliawati; Practical Framework: Implementing OEE Method in Manufacturing Process Environment IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. 114 012093
39. R. Singh, D. B. Shah, A. M. Gohil, M. H. Shah; Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation: Automation through Hardware & Software Development, Procedia Engineering, 2013 vol. 51, pages. 579-584.
40. L. D. C. N. Corrales, M. P. Lambán, M. E. Hernandez, J. Royo; Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches, Applied Sciences, 2020 vol. 10, no. 18
41. S. Ma, W. Ding, Y. Liu, Y. Zhang, S. Ren, X. Kong, J. Leng; Industry 4.0 and cleaner production: A comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries, [Journal of Cleaner Production Volume 467](#), 15 August 2024, 142879
42. J. Kopeinig, M. Woschank, N. Olipp; Industry 4.0 Technologies and their Implications for Environmental Sustainability in the Manufacturing Industry, Procedia Computer Science, Volume 232, 2024, Pages 2777-2789,
43. E. Hofmann, M. Rüsch; Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics, [Computers in Industry Volume 89](#), August 2017, Pages 23-34
44. Szabó Zs. R., Horváth D., Hortoványi L., Hálózati tanulás az ipar 4.0 korában, Közgazdasági Szemle, LXVI. évf., 2019. január (72–94. o.)
45. Industrie 4.0 Innovationen im Zeitalter der Digitalisierung. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021.
46. Dr. R. Schlaepfer, M. Koch, Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Deloitte AG, Zürich, Svájc. 2015
47. W. S. Admass, Y. Y. Munaye, A. A. Diro; Cyber security: State of the art, challenges and future directions, Cyber Security and Applications Volume 2, 2024, 100031
48. R. Rozs, M. Ando, Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems in the 21st Century Industry, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 64(1), pp. 51–66, 2020

49. V. Rutgers, D. Johnston, N. Davis, N. Farkas-Mills; The Fourth Industrial Revolution At the intersection of readiness and responsibility, Deloitte Insights 2020
50. Losonci D., Takács O., Demeter K., Az ipar 4.0 hatásainak nyomában – a magyarországi járműipar elemzése, Közgazdasági Szemle LXVI. ÉVF., 2019. február (185–218. o.)
51. H. D. Schröder, Digitization, Digitalisierung in(Hans-Bredow-Institut Hrsg.), Medien von A bis Z, VSVerlag für Sozialwissenschaften / GWV FachverlageGmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2006; pages. 95–97
52. F. Costa, S. Freccasetti, M. Rossini, A. Portioli Staudacher; Industry 4.0 digital technologies enhancing sustainability: Applications and barriers from the agricultural industry in an emerging economy, [Journal of Cleaner Production Volume 408](#), 1 July 2023, 137208
53. A. Amaral, P. Pecas; SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration, [Computers in Industry, Volume 125](#), February 2021, 103333
54. D. Antonelli, G. Bruno, T. Taurino, A. Villa; Conditions for Effective Collaboration in SME Networks Based on Graph Model. In: Camarinha-Matos, L.M., Scherer, R.J. (eds) Collaborative Systems for Reindustrialization. PRO-VE 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 408. Springer
55. A. Villa, T. Taurino; SME Innovation and Development in the Context of Industry 4.0, *Procedia Manufacturing* 39, 2019 1415–1420
56. S. Haberer, L. K. Lau, F. Behrendt; Development of an Industrie 4.0 Maturity Index for Small and Medium-Sized Enterprises, IESM 2017 - 7th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management Vol 7th.
57. R. Dumitrescu, J. GAusemeier; Volume; Innovationen im Zeitalter der Digitalisierung, *Industrie 4.0. Management*, 34. 2018, Pages 7-11
58. Y. Zhao, Z. Zhu, B. Chen, S. Qiu, J. Huang, X. Lu, W. Yang, C. Ai, K. Huang, C. He, Y. Jin, Z. Liu, F. Wan; Toward parallel intelligence: An interdisciplinary solution for complex systems, *The Innovation*, 2023, Volume 4, Issue 6,

59. Erdei J., Nagy J. B., Dr. Topár J., Dr. Tóth Zs. E.; Minőségmenedzsment, 2010 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem-és Társadalomtudományi Kar Üzleti Tudományok Intézete, Budapest 16. old.
60. M. P. Kumar, P. Saithithi, S. S. Revanth; Industry of quality (IoQ) – An industry 4.0 perspective, International Journal of Applied Research, 2020, Vol. 6, No. 4, pp.109–114
61. ISO: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2005). 2005
62. G. Abe, M. Aritoshhi, T. Tomita, K. Shirashe; Machining Error Compensation Based on 3D Surface Model Modified by Measured Accuracy, Hyogo Prefectural Institute of Technology, 2008, Vol.2, pp.793-799
63. Malgorzata Poniatowska, Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model, Computer-Aided Design 62 (2015) 227–235 2014
64. H. L. Liu, M. Rasheed, H. H. Younis; A line measurement method for geometric error measurement of the vertical machining center, SN Applied Sciences, 2019, vol. 1, no. 324fw
65. H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R.Schmitt, F. Delbressine; Geometric error measurement and compensation of machines – An update. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2008, vol. 572, pp.660-675
66. P. Zheng, H. Wang, Z. Sang, R. Y. Zhong, Y. Liu, C. Liu, K. Mubarak, S. Yu, X. Xu; Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives, Frontiers in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 13, No. 2, pages.137–150.
67. V. Modrák; Functionalities and Integration Possibilities of Manufacturing Execution Systems, Technical University of Košice, Slovakia 2009, Vol. 10, No. 1, pages146-155
68. A. N. Yukse, E. Sener; The Reflections of Digialization at Organizational Level: I 4.0 in Turkey, Pressacademia.2017.688 JBEF- V.6-ISS.3-2017(9)-pages 291-300

69. M. Soori, B. Arezoo, R. Dastres; Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review, *Cognitive Robotics Volume 3*, 2023, Pages 54-70
70. B. M. Balachandran, S. Prasad; Challenges and Benefits of Deploying Big Data Analytics in the Cloud for Business Intelligence, *Procedia Computer Science* 2017, 112: pages 1112-1122
71. Z. Kang, C. Catal, B. Tekinerdogan; Machine learning applications in production lines: A systematic literature review; [Computers & Industrial Engineering, Volume 149](#), 2020, 106773
72. I.H. Sarker; Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions, 2021 *SN COMPUT. SCI.* 2, 160
73. S. Messaouda, A. Bradai, S. H. R. Bukhari, P. T. A. Quang, O. B. Ahmede, M. Atrif; A survey on machine learning in Internet of Things: Algorithms, strategies, and applications, *Internet of Things 2020 Volume 12*, 100314
74. <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/> elérhető: 2025.01.03
75. <https://www.sap.com/hungary/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> elérhető: 2025.01.03
76. P. Borra; An Overview of Cloud Computing and Leading Cloud Service Providers, *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET) Volume 15, Issue 3, May-June 2024*, pp. 122-133
77. N. Jabeur, N. Sahli, S. Zeadally; Enabling Cyber Physical Systems with Wireless Sensor Networking Technologies, Multiagent System Paradigm, and Natural Ecosystems, *Mobile Information Systems*, 2015, 908315, 15 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/908315>
78. M. Hanefi Calp, R. Bütüner; Chapter 7 - Society 5.0: Effective technology for a smart society, *Artificial Intelligence and Industry 4.0, Intelligent Data-Centric Systems*, 2022, Pages 175-194
79. MTConnect R Standard Part 1.0 – Overview and Fundamentals Version 1.6.0, MTConnect Institute, 2020, pp 9
80. S. Fu, N. Avdelidis; Prognostic and Health Management of Critical Aircraft Systems and Components: An Overview, September 2023, *Sensors* 23(19):8124 DOI: 10.3390/s23198124

81. L. Zhou, J. Li, L. Fangyi; Energy Consumption Model and Energy Efficiency of Machine Tools: A Comprehensive Literature Review, June 2015 Journal of Cleaner Production 112(14) DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093
82. C. Tang, J. Liu; Selecting a trusted cloud service provider for your SaaS program, Computers & Security Volume 50, May 2015, Pages 60-73
83. G. Martinov, A. Ljubimov, L. I. Martinova; From classic CNC systems to cloud-based technology and back, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Volume 63, June 2020, 101927
84. R. Geng, M. Li, Z. Hu; Digital Twin in smart manufacturing: remote control and virtual machining using VR and AR technologies. Struct Multidisc Optim 65, 321 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03426-3>
85. P. Zheng, H. Wang, Z. Sang; Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives January 2018 Frontiers of Mechanical Engineering 13(8) DOI: 10.1007/s11465-018-0499-5
86. S. J. Oks, M. Jalowski, M. Lechner, K. Moeslein; Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook April 2022 Information Systems Frontiers 26(5):1731-1772 DOI: 10.1007/s10796-022-10252-x
87. <https://www.capellasolutions.com/blog/best-practices-for-deploying-ai-models-in-production> elérhető: 2025.01.03
88. F. Bonada, L. Echeverria, X. Domingo, G. Anzaldi; AI for Improving the Overall Equipment Efficiency in Manufacturing Industry, [New Trends in the Use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0](#) , 2020, DOI: 10.5772/intechopen.89967
89. Y. Liu, Y. Liu, T. Wang, Z. Wang, Q. Huang; Mathematical modeling and analysis of the tailor rolled blank manufacturing process, International Journal of Mechanical Sciences Volume 266, 15 March 2024, 108991
90. CNC.HU 2015: A koordináta mérőgépek szerkezeti kialakítása I; <https://www.cnc.hu/2015/04/a-koordinata-merogepek-szerkezeti-kialakitasa-i/>, elérhető: 2025.01.03
91. Air Quality Effects on Measuring Machine <http://m.cmm-nano.com/info/air-quality-effects-on-measuring-machine-17060314.html> elérhető: 2025.01.03

92. Renishaw (2021): Touch trigger probes, <https://www.renishaw.com/en/touch-trigger-probes--6652>, elérhető: 2025.01.03
93. COORD3 Metrology (2021): Industrial Metrology System, : <https://coord3.com/en/cmm-universal-2/>, elérhető: 2025.01.03
94. A. Bastas; Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe, Measurement, Volume 156, 2020, 107604
95. S. Yijun, J. Ren, N. Huang, L. Zhu; Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review April 2023, [International Journal of Extreme Manufacturing](#) 5(2):022006
96. ISO 10360-7:2011, Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems
97. J. J. Zhang; Chapter 1 - Stresses and strains, [Applied Petroleum Geomechanics](#) 2019, Pages 1-27
98. J. R. Wagner, Jr., E. M. Mount III, H. F. Giles Jr.; 26 – Quality, [Extrusion \(Second Edition\)](#) The Definitive Processing Guide and Handbook, Plastics Design Library, 2014, Pages 309-313
99. K. Kouzehgar, S. Eslamian; Chapter 2 - Application of experimental data and soft computing techniques in determining the outflow and breach characteristics in embankments and landslide dams, [Handbook of Hydroinformatics](#), Volume III : Water Data Management Best Practices, 2023, Pages 11-31
100. W. Kanyongo, A. E. Ezugwu; Feature selection and importance of predictors of non-communicable diseases medication adherence from machine learning research perspectives, [Informatics in Medicine Unlocked](#), Volume 38, 2023, 101232
101. A. M. Andrés, I. Herranz; On Conditions for Validity of the Approximations to Fisher's Exact Test, [Biometrical Journal](#) 1997, 39(8):935 - 954
102. Valószínűség és Számlelmélet összefoglaló, jegyzet, https://slinkyone.web.elte.hu/data/Valószínűségszámítás%20és%20statisztika%20-%20%5BZempléni%20-%20Dobi%5D/valstat_v_kidolgozas.pdf elérhető: 2025.01.03.

103. R Prajapati, Fixture Modification of a 5-Axis CNC Machine (Makino), Int J Eng Adv Technol. 2017; 2: 2249–8958. doi: 10.13140/RG.2.2.21127.70565.
104. A. Görög I., Görögová, Research of the Influence of Clamping Forces on the Roundness Deviations of the Pipes Turned Surface, Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 2018;26(42): 47–54. doi: 10.2478/rput-2018-0005
105. K. P. Padmanaban, S. Selvakumar K. Arulshri, K. Sasikumar, Clamping Force Optimization for Minimum Deformation of Workpiece by Dynamic Analysis of Workpiece-fixture System, World Appl Sci J, 2010;11(7): 840–846,
106. F. Sun,H. Sun, On influence of contact deformation on machining errors of workpiece. Modern Manufacturing Engineering, 2004; (1):71-73
107. I. Biró, T. Szalay, Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling, Int J Adv Manuf Technol. 2017; 88:2735–2743
108. J. Asante; Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability, Int J Adv Manuf Technol. 2010;48(1-4):33-43. doi:10.1007/s00170-009-2284-4
109. G. Qin, Z. Wu, W. Zhang; Analysis and control technique of fixturing deformation mechanism of thin-walled workpiece. J Mech Eng. 2007;(04):211-216+223.
110. B. Tadic, B. Jeremic, P. Todorovic, U Proso, V Mandic, I Budak; Efficient Workpiece Clamping by Indenting Cone shaped Elements, Int J Precision Eng Manuf. 2012;13(10):1725-1735. doi:10.1007/s12541-012-0227-8
111. Z. Zi, Z. Yang, T. Kai; Sweep scan path planning for efficient freeform surface inspection on five-axis CMM, Comput Aided Design. 2016; 77:1–17. doi: 10.1016/j.cad.2016.03.003
112. Renishaw plc, CMM technology guide - A guide to CMM sensor technology-the heart of any CMM [Brochure]. 2009; 0609 UK Part No. H-1000-6050-03

113. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS). Part 5: Coordinate measuring machines (CMMs) using single and multiple stylus contacting probing systems using discrete point and/or scanning measuring mode:2020)
114. Schoppe E, Vogal E, Simulation of Workpiece Deformation caused by Machining and Clamping Forces, <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/751eae9-7614-4b4f-b896-cc38c5401e2b/content> accessed; 04.2024
115. G. Bomba, A. Ornath, P. Gierlak; Geometric Measurements on a CNC Machining Device as an Element of Closed Door Technology July 2021, [Sensors](#) 21(14):4852 DOI: [10.3390/s21144852](https://doi.org/10.3390/s21144852)
116. M. T. Biroş, D. Ledenyák, M. Andó; Effect of FDM infill patterns on mechanical properties, [Polymer Testing Volume 113](#), 2022, 107654
117. D. Ledenyák, Zs. Kovács, T. Rosta; [Hagyományos és modern mérőeszközök összehasonlítása pontosság és alkalmazhatóság szerint, 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.
118. B. Eckart; MLMD: Maximum Likelihood Mixture Decoupling for Fast and Accurate Point Cloud Registration, 2015 International Conference on 3D Vision, Lyon, France, 2015, pp 241-249
119. R. B. Rusu, N. Blodow, M. Beetz; Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009 DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152473
120. C. Siheng, L. Baoan, F. Chen, V. Carlos, W. Carl; 3D Point Cloud Processing and Learning for Autonomous Driving, MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, 2020 , TR2020-066
121. T. Xi, I. M. Beninca, S. Kehne, M. Fey, C. Brecher; Tool wear monitoring in roughing and finishing processes based on machine internal data, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2021 113(5):1-12 DOI:[10.1007/s00170-021-06748-6](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06748-6)
122. S. McClean; Data Mining and Knowledge Discovery, [Encyclopedia of Physical Science and Technology \(Third Edition\)](#), 2003, Pages 229-246

123. G. Bontempi, S. Taieb, Y-A Le Borgne; Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting, January 2013 [Lecture Notes in Business Information Processing](#) 138 Pages 62-77 DOI:[10.1007/978-3-642-36318-4_3](#)
124. R. Baxter, W. Levy; Constructing multilayered neural networks with sparse, data-driven connectivity using biologically-inspired, complementary, homeostatic mechanisms, [Neural Networks](#), [Volume 122](#), February 2020, Pages 68-93
125. I. Mienye, T. G. Swart, G. Obaide; Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications, Information 2024, 15(9), 517; <https://doi.org/10.3390/info15090517>
126. M. Abadi, J. Chen, P. Barham; TensorFlow: A system for large-scale machine learning, Google Brain, May 2016 DOI: 10.48550/arXiv.1605.08695
127. J-m. Jo, Effectiveness of Normalization Pre-Processing of Big Data to the Machine Learning Performance, January 2019 [The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences](#) 14(3):547-552 DOI: [10.13067/JKIECS.2019.14.3.547](#)
128. [www.tensorflow.org](#),
[https://www.tensorflow.org/tutorials/structured_data/time_series#advanced_autoregressive_model](#) 28.12.2024
129. D. Ledenyák, T. Rosta, H. Hargitai, Novel Technique for Reducing Geometrical Inaccuracies of Clamped Workpiece During, A. Khotsianovsky and Y. Chen (Eds.), Material Strength and Applied Mechanics, 2024, pp. 269-276.
130. D. Powell, M. Ch. Magnanini, M. Colledani, O. Myklebust, Advancing zero defect manufacturing: A state-of-the-art perspective and future research directions, Computers in Industry 2022, Vol 136
131. E. Nergiz, H Barutcu, The Impact of Industry 4.0 Applications on Production Processes: The Case of Bosch Industry and Trade Corporation, Econder International Academic Journal, June 2020 4(1):47-71
132. H. Berg, P. Bendix, M. Jansen, K. Blévenec, P. Bottermann, M. Magnus-Melgar, E. Pohjalainen, M. Wahlström: Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production, European Environment Agency 2021

133. Renishaw plc, QC20 ballbar technology guide -[Brochure]. 2024; Part no.: L-8014-9054-01-A
134. H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R.Schmitt, F. Delbressine; Geometric error measurement and compensation of machines – An update. CIRP Annuals – Manufacturing Technology, 2018, vol. 572, pp.660-675
135. K. Cunha, R. dos Santos, L. D'Avila, R. Cabette, W. Muniz, P. Prado, L. Honorato, M. Motta, C. Jaeger, J. Chagas, G. Boaventura, R. Gama, Adriano C. Rosa The Reliability of Metrologia 4.0 Data in the Industrial Technological Scenario: How This can Impact the Forms of Dimensional Control in the Industry International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volume-7, Issue-4, April 2020 pp 34-38
136. R. Čep, Š. Malotová, J. Kratochvíl, D. Stančeková, A. Czán,T. Jakab, Diagnosis of machine tool with using Renishaw ball-bar system, MATEC Web of Conferences 157,2018, 01006
137. <https://www.haascnc.com/hu/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/renishaw-ballbar-test---plot-interpretation---mills.html> elérhető: 2025.01.07.
138. M. Císar, V. Tlach, I. Zajačko, Various methods of circular interpolation performance analysis, MATEC Web of Conferences 357, 01004 (2022)
139. H. Foidl, M. Felderer, Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management. Innovations in Enterprise Information Systems Management and Engineering. ERP Future 2015. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 245. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32799-0_10
140. Innovation management. Innovation management system. Guidance (ISO 56002:2019)

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék továbbá köszönetet mondani a családomnak, kutatótársaimnak, Beshoy Labibnak, konzulenseimnek, barátaimnak, Hegedűs Kúti Jánosnak, Kovács Zsoltnak és Fekete Gusztávnak, akik segítettek, biztattak.

Mellékletek:

Ipari forradalmak

Adatsor machine learning számára

Adatsor 1 Ballbar

Adatsor 2 Ballbar

Adatsor 3 Ballbar