

ÓBUDAI EGYETEM ÓBUDA UNIVERSITY

Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

# HABILITÁCIÓS TÉZISEK

# DIMENZIONÁLIS METROLÓGIAI MÓDSZEREK VIZSGÁLATA

Dr. Drégelyi-Kiss Ágota

egyetemi docens

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Gépészeti és Technológiai Intézet

Budapest, 2023

# Tartalomjegyzék

Bevezetés	. 3
A kutatás előzményei	. 4
Metrológiai folyamatok	. 4
Kísérletek tervezése, adatok értékelése többváltozós statisztikai módszerekkel	. 7
Mérési módszerek	. 8
Felületi érdességmérés	. 8
Profilprojektor	. 9
Ipari computer tomográf (CT)1	10
Új tudományos eredmények1	13
Felületi érdesség mérések bizonytalansági összetevői	13
1. tézis 1	13
Az eredmények részletezése	13
2. tézis1	17
Az eredmények részletezése	17
Mérési pontszám meghatározása profilprojektoros méréseknél2	21
3. tézis	21
Az eredmények részletezése 2	21
Ipari CT mérési bizonytalanságának feltérképezése	24
4. tézis	24
Az eredmények részletezése 2	24
5. tézis	33
Az eredmények részletezése	33
A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja	39
Irodalmi hivatkozások listája	41
A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	13
További tudományos közlemények	44

#### BEVEZETÉS

A hosszméréstechnikai eszközök használata elengedhetetlen a forgácsolással vagy más gyártási módszerrel előállított alkatrészek minőségének és megfelelőségének jellemzésére. A 2D vagy 3D koordináta mérőgépekkel pontos képet alkothatunk a termékek jellemzőiről, a méretekről, az alak- és helyzettűrésezés (GD&T) paraméterekről, valamint a felületi minőségről, a felületi érdességről.

Kutatásaim során három különböző mérőberendezéssel történő mérési folyamatokat elemeztem, vizsgáltam. Az Óbudai Egyetem Gépészeti és Technológiai Intézetében már hosszú időre visszanyúló kutatási területben mélyedtem el, felületi érdesség mérésekkel foglalkoztam először. A mért felületi érdesség paraméterei és a forgácsolási eljárás paraméterei között kerestünk kapcsolatot munkatársaimmal. A későbbiekben a felületi érdesség mérési folyamat bizonytalanságát határoztam meg, különös tekintettel az autóiparban történő alkalmazására.

A második tématerület a 2D méréstechnika területén a profilprojektorral történő mérési folyamat elemzése. A vizsgálatokkal meghatároztam, hogy mennyi pont felvétele optimális egy lemezszerű alkatrész méretének a meghatározása során.

A 3D méréstechnika folyamatos fejlődésével lehetővé vált 2010-ra, hogy ipari computer tomográfia (CT) felvételek készítésével ne csupán az anyagok belső szerkezetét vizsgálhassuk roncsolásmentesen, hanem – mint optikai elven történő 3D mérőberendezés – a méreteket is meg tudjuk határozni 0,01 mm vagy akár nagyobb pontossággal is. A jelenleg is tartó kutatásaim során azt vizsgálom, hogy az ipari CT berendezéssel történő dimenzionális mérések milyen mértékben pontosak, mekkora bizonytalanságot tartalmaznak.

#### A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

#### METROLÓGIAI FOLYAMATOK

A mértékek és mértékegységek igénye és létrejötte majdnem egyidős az emberi civilizáció kialakulásával. Tulajdonképpen a mérés fogalma a számfogalom kialakulásával párhuzamosan keletkezett. Az emberi civilizáció történetében a mérések és mértékek tekintetében az igazán nagy fejlődéseket mindig a kereskedelmi tevékenységek indukálták. A történelem során a nagy civilizációs kultúrákban mindenhol fellelhetők a mértékegységek nyomai. Ugyanis az uralkodó csoportok ezen kultúrákban felismerték, hogy milyen fontos az egyes termékek és élelmiszer alapanyagok mennyiségének (súly- és űrmértékek), geometriai formák nagyságának (hosszúság mértékek) és földterületek nagyságának (terület mértékek) egységes, összehasonlítható és a közösség által elfogadott ("hiteles") mérése. Nagyon fontos megemlíteni, hogy ezen korszakokban a mérések "hitelességét" természetesen csak erkölcsi alapokon volt lehetséges biztosítani. Műszaki vagy tudományos értelembe vett "hitelességet" csak a XIX. század második felétől van értelme említeni.

A metrológia (metron - mérték, logos - ész, értelem) a mérés tudománya. A metrológia a mérésekkel kapcsolatos minden elméleti és gyakorlati szempontot magába foglal, bármekkora legyen is a mérés bizonytalansága, és a tudomány vagy a technológia bármely területén is végezzék azokat. A metrológia alkalmazott tudomány, mely a kvantitatív ismeretszerzési folyamatok tervezéséhez, végrehajtásához és az eredmények értékeléséhez nyújt ismereteket [VIM3, 2012].

A mérés során más mennyiségek is jelen vannak, melyek befolyásolják a mérés eredményét. A befolyásoló mennyiség a mérendő mennyiségtől különböző olyan mennyiség, amely hatással van a mérési eredményre (pl.: hőmérséklet, rezgés stb.). A zavaró mennyiség olyan befolyásoló mennyiség, melynek hatása nem ismert. A kétfajta hatás között az az alapvető eltérés, hogy a befolyásoló mennyiség mérési eredményre gyakorolt hatását ismerjük (fizikai összefüggéssel leírható), ez a hatás korrigálható, míg a zavaró mennyiség befolyásolja a mérési eredményt, de ennek mértéke nem ismert.

A tapasztalat igazolja, hogy az ismételt mérések eredményei általában nem egyezőek. A mérőeszköz működése, a környezet, a mérőszemély előre nem meghatározható módon, de befolyással van az eredményre. Ez a véletlen hibából adódóan okozza az eltéréseket, melyek csökkenthetők a mérések számának növelésével.

Az etalon definiálja a mennyiség egységét, egy vagy több ismert értékét, mint vonatkoztatási alapot, azt megvalósítja, fenntartja vagy reprodukálja. Az etalon a mérőeszköz ellenőrzéséhez vagy beszabályozásához a mérendő mennyiség referenciaértékét mérő vagy reprodukáló mérőeszköz. Fontos tulajdonsága, hogy ismert a mérési vagy definiálási bizonytalansága, mely elhanyagolható a mérőeszköz bizonytalanságához képest.

Nemzetközi, nemzeti és természetesen vevői igény, hogy a mérési eredmények megbízhatóak és összehasonlíthatók legyenek. A vizsgálólaboratóriumok működésének feltétele többek között az etalonok visszavezethetőségének igazolása, de vállalati kalibrálás esetén is szükséges az etalonok egy pontosabb etalonnal történő összehasonlításának igazolása. A metrológiai visszavezetettség egy mérési eredménynek az a tulajdonsága, hogy az eredmény egy referenciához tartozik a kalibrálások dokumentált, megszakítatlan láncolatán keresztül, melyek mindegyike hozzájárul a mérési bizonytalansághoz. [VIM3, 2012].

A mérési eredmények mindegyikét meghamisítja egy nem tökéletes mérési módszer, mérőberendezés vagy etalon, a környezet behatásai, a mérést végző személy szubjektív adottságai és más, többféle általunk nem ismert, de jelenlévő véletlen hatás. Emiatt a mérendő mennyiség "valódi" értéke és a mért érték között mindig van eltérés. (A fizikai állandók esetén a mennyiség úgy tekinthető, hogy egyetlen valódi mennyiségértéke van.) A valódi érték kísérletileg nem állapítható meg, de kétségtelenül létezik. A valódi értéket nem ismerhetjük meg, csak törekszünk annak legjobb becslésére, a referenciának tekinthető érték meghatározására. A becslés az elméleti jellemzők adott eljárással, módszerrel történő közelítése (korlátozott pontosságú meghatározása) az ismert véges számú és véges pontosságú adatból. Általánosan referencia értéknek (reference value) nevezzük a mérendő mennyiség értékét, amelyet valamely összehasonlítás alapjául kívánjuk használni. A referencia érték lehet a mérendő mennyiség valódi értéke, és abban az esetben, amikor ezen érték nem ismert, a konvencionális értéke.

A mérési pontosság (accuracy) azt mutatja meg, hogy mennyire egyezik meg a mérendő mennyiség értéke a mennyiség valódi értékével. A mérési hiba (error) a mérendő mennyiség értékének és a mérendő mennyiség referencia értékének különbsége:

$$H_i = x_i - x_{reg}$$

ahol:  $H_i$  - a mérési hiba;  $x_i$  - a mért érték;  $x_{ref}$  - a referencia érték.

A mérések precizitását a véletlen hibák jellemzik. A véletlen hibák változó hatást mutatnak, a hibaokok időben és térben véletlenszerűen jelentkeznek, tehát nagyságuk és előjelük előre nem ismert módon változik, ezért hatásuk csak bizonytalanságként írható le. A véletlen hibák valószínűségi változók, értékelésükre a valószínűség számítás módszerei alkalmasak. Jellemezhetők egy olyan a hibatartománnyal (sávval), mely tartalmazza adott valószínűségel a mérendő mennyiség valódi értékét. A mérési eredmény hibája is e sávon belül található meg adott valószínűségel.

A bizonytalanság a mérési eredmény minőségének mennyiségi mértéke, lehetővé teszi a mérési eredmény összehasonlíthatóságát más eredményekkel, referenciákkal, műszaki jellemzőkkel vagy szabványokkal. Minden mérés hibával terhelt, ezért a mérési eredmény eltér a mérendő mennyiség valódi értékétől.

Megfelelő idő és erőforrások esetén a mérési hiba legtöbb forrása felderíthető, és a mérési hiba meghatározható és korrigálható (például kalibrálások által). A mérési bizonytalanságot különböző módon lehet meghatározni. Széles körben használt és elfogadott módszer a "GUMmódszer"[GUM, 2008]. A mérési bizonytalanság az eredmény minőségére vonatkozó számszerű jelzés, a mérési eredmény megbízhatóságát jellemzi. Enélkül az eredményeket nem lehet összehasonlítani sem egymással, sem a referencia értékkel (melyet szabvány vagy szerződés rögzít). A különböző helyeken készült alkatrészek szerelhetősége, a különböző laboratóriumok vizsgálati eredményeinek hitelessége, a jogi természetű, méréssel igazolható döntések igazságossága, és sok más helyzet mind azt igénylik, hogy pontos képet kapjunk arról a tartományról, amelyen belül a valódi érték adott valószínűséggel megtalálható. Ezért szükséges, hogy megismerjünk egy elfogadott eljárást az eredmény minőségének jellemzésére, vagyis a valódi érték "bizonytalanságának" kifejezésére és kiértékelésére. Ez a módszer célszerűen használható mindenfajta mérésnél, független, közvetlenül leszármaztatható, felhasználható másik mérés bizonytalanságának kiértékelésénél.

A mérések bizonytalanságának meghatározása a dimenzionális mérések esetén is szükségszerű. A 3D méréstechnika területén foglalkoznak a hiba feltérképezésével koordináta mérőgép esetén [Schwenke et al., 2005, Sladek és Gaska, 2012], konkrét feladathoz tartozó mérési bizonytalanság meghatározásához [Wilhelm et al., 2001, Weckenmann et al., 2001], gyártóberendezések belső mérőeszközeinél [He et al., 2015]. A 3D méréstechnikai eszközök folyamatosan fejlődnek, újabb és újabb technológiák jelennek meg. Manapság a mérések gyorsasága miatt előszeretettel használnak ipari computer tomográfot a gyártott alkatrészek dimenzionális, GD&T paramétereinek a vizsgálatára [Hiller és Hornberger, 2016; Bartscher et al., 2016]. A mérési folyamat nagyon összetett, és folyamatos kutatásokkal, esettanulmányokkal térképezik fel a CT mérési folyamat bizonytalansági összetevőinek a hatását [Carmignato et al., 2018].

# KÍSÉRLETEK TERVEZÉSE, ADATOK ÉRTÉKELÉSE TÖBBVÁLTOZÓS STATISZTIKAI MÓDSZEREKKEL

A mérési adatok értékelése során többváltozós statisztikai módszereket használunk a szignifikáns hatások, paraméterek hatásának a meghatározása céljából. A kísérlettervezés, vagy DoE (Design of Experiments) módszerei lehetőséget adnak, hogy kevés számú, előre megtervezett beállításokkal elvégzett kísérletek, mérések során maximális mértékű információt nyerjünk ki [Montgomery, 2017]. A DoE használatával többváltozó lineáris vagy kvadratikus matematikai modellek készítésével meghatározhatóak az egyes paraméterek hatásai a mérési eredményre, valamint optimalizálási feladatot is meg tudunk oldani. Egy könyvfejezetben összefoglaltam a DOE használatát a forgácsoláskutatásban [12].

A tervezett kísérletek legegyszerűbb formája a kétszintes faktortervek, amellyel minden paraméter hatását két beállításon tudjuk vizsgálni, ez esetben lineáris többváltozós modell becsülhető. A kísérlettervezés lényege, hogy minimális számú kísérlet végrehajtásával kapjuk meg az eredményeket, és statisztikai alapon összefüggést keressünk a paraméterek (faktorok) és a kimeneti változó között. Kétszintes, két blokkban végrehajtott kísérlettervet készítettem és az eredményeket kiértékeltem fúrószerszámok előkészítési folyamatának a meghatározásához [13]. Az eredmények alapján egy statisztikai modellt hoztam létre, amely használatos az ipari partnerünknél.

Taguchi dolgozott ki olyan kísérletterveket [Taguchi et al., 2005], amelyekkel nagy számú faktor hatását lehet vizsgálni kevés kísérletből, továbbá a két lépéses optimalizálási módszere könnyen használható az ipari szakemberek részéről is. Egy munkámban [14] Taguchi L<sub>36</sub> módszert használtunk az alumínium esztergálási folyamat paraméterei hatásának a vizsgálatára, az optimális beállítás meghatározására.

A paraméterek négyzetes hatásainak a figyelembevételére dolgozták ki az RSM (response surface method) kísérletterveket [Myer és Montgomery, 2002]. Több forgácsoláskutatási feladat esetén használtuk az RSM módszereket [15,16].

Az optimalizálási folyamat történhet egy változóra, mint a fent leírt esetekben, de lehetőség van a kívánatossági függvények használatával több kimeneti változóra, szimultán történő optimalizálási feladat megoldása: dudorhegesztési folyamatra készítettem optimalizálást [17], valamint alumínium esztergálási folyamat esetén [16].

A kutatási munkám során a mérési bizonytalanság számításához is tervezett kísérleteket használok, így határozom meg a szignifikáns paramétereket a mérési eredményre, és a bonyolultabb mérési folyamatok (például CT-vel történő hosszmérés) esetén a minimális mérési hibára optimális paraméterbeállításokat lehet használni a kísérletek lefolytatása után.

#### FELÜLETI ÉRDESSÉGMÉRÉS

A felületek mikrogeometriájának, topográfiájának két fő jellegzetes megismerési módja van. Egyik az érdességmérő műszerek segítségével metszettapintó elven (lehet pl. lézer-optikai vagy számos más elv is) felvett profildiagram és az abból, illetve azok sorozatából származtatott 2D-s, 3D-s jellemző paraméterek, függvények. A másik módja pedig az, amikor egy optikai eszközzel pl. elektronmikroszkóppal készítünk nagy nagyítású felületi képet. A gépészeti gyakorlatban a 2D-s kiértékelés az üzemekben meglévő érdességmérő műszerek és a gyors, praktikus kiértékelés miatt még sokáig széles körben alkalmazott lesz. Figyelni kell viszont arra, hogy a technológia szabatos megtervezéséhez a kiértékelés szolgáltatásait célszerűen bővíteni kell.

A metszettapintó elv azt jelenti, hogy a valóságos felületek egy metszetét, egy szeletét (profilját) "kiemeljük" a felületből és ezen történik az érdességi (R), hullámossági (W) és a teljes profil (P) paramétereinek kiértékelése. A célszerűen megválasztott nagyítással felvett profildiagramok jól tükrözik a felület jellegét, s kellő tapasztalat és gyakorlat birtokában sok lényeges információ forrásai lehetnek. A korszerű metszettapintó műszerek lehetővé teszik az érdességi és hullámossági profilok, valamint a szűrés nélküli, torzítatlan profilképek felrajzolását. Az így felvett profildiagramok szinte nélkülözhetetlenek az átfogó mikrogeometriai értékelés megadásához. Az értékeléskor figyelembe kell venni azt is, hogy a függőleges és a vízszintes nagyítások jelentős különbsége miatt az ábrázolás torzított, illetve azt, hogy a különböző megmunkálások más-más profiljelleget adnak.

A felületi mikrogeometriát jellemző paraméterek kialakításánál az a törekvés, hogy a kétdimenziós felületprofil mindkét irányú (magasság, hossz) és formai jellegzetességeit is ki tudjuk mutatni. A felületi mikrogeometriához kapcsolódó fogalom-meghatározásokat és a jellemzőket szabványosították. A jelenleg érvényes nemzetközi szabvány az ISO 21920-2:2021, amely alapján a jellemző paraméterek több csoportba sorolhatók:

- az egyenetlenségek magasságával kapcsolatos jellemzők: Ra, Wa, Pa; Rq, Wq, Pq; Rt, Wt, Pt; Rsk; Rku
- az egyenetlenségek csúcs-völgy paraméterei: Rp, Wp, Pp; Rv, Wv, Pv; Rz, Wz, Pz; Rmax, Wmax, Pmax
- az egyenetlenségek formájával kapcsolatos (ún. hibrid) jellemzők: Rdq, Wdq, Pdq; Rda, Wda, Pda; Rdt, Wdt, Pdt

A felületi mikrogeometriát összességében és legpontosabban a szűrés nélküli ún. teljes profil (P-profil) jellemzi. A méréstechnikai és kiértékelési gyakorlatban viszont e profil összetevői, az érdességi (R-profil) és a hullámossági (W) profil játszik kiemeltebb szerepet. De mivel az újabb fejlesztésű műszerek már a P-profil paramétereit is szolgáltatják, célszerűnek látszik ezeket is vizsgálatba vonni [1].

A kutatásaim során használt mérőeszközök: Mahr-Perthometer felületi érdességmérő MarSurf XCR-20 értékelő szoftverrel, Surftest SJ301 felületi érdességmérő.

# PROFILPROJEKTOR

A profilprojektorok, vagy másképp nevezve optikai összehasonlító berendezések, sokoldalú eszközök melyet a világ minden táján alkalmaznak a méréstechnikában. A berendezés alapkoncepciója, hogy egy nagyított árnyékképet vetít a munkadarabról egy vetítőernyőre, amin a méréseket elvégezhetjük. A munkadarab egy precíz asztalon helyezkedik el, amivel a fénysugárban lehet mozgatni, tehát a mérési pont a referencia pontra mozgatható (szálkereszt) a vetítőernyő közepére, ami éppúgy a középpontja a vetítőernyő-szögmérőnek. A pozíciót az asztal útmérő rendszeréről olvashatjuk le [Farago és Curtis, 2007].

Az optikai profilprojektoroknak, mint vizsgálóberendezéseknek sok előnyös tulajdonságuk van:

- A vetített képet egyszerre több ember tudja figyelni, így a vizsgálati folyamat egy csoport által is analizálható.
- Számos méret és alakjellemzők vizsgálhatók, összehasonlíthatók a munkadarabon egy felfogásból.
- A vizsgált méretek, alakzatok száma a munkadarabon, akár egyedileg vagy összefüggően más méretekkel vagy alakzatokkal ugyanazon a munkadarabon, növelhető anélkül, hogy további műszereket vagy egységeket kellene a gépre szerelni, amíg a vizsgált méretek, alakzatok közös vizsgálati síkban helyezkednek el.
- A mechanikai mérőeszközökkel szemben a profilprojektorok mérőnyomás nélkül képesek mérni. A mechanikai mérőeszközökkel ellentétben az optikai méréseknél nem kopnak az alkatrészek.
- Ha a profilprojektor alkalmas rá, akkor lehetőség van a méréseket közvetlenül CAD modellel összevetni.

A projektorral történő mérés során a tárgylemezre helyezzük a kívánt alkatrészt, és X;Y pontpárokat veszünk fel az üveglapon keresztül kialakult vetített képről a projektoron található szálkereszt vagy szoftveresen beépített, automata éldetektálás segítségével. Kutatásaim során vizsgáltam a felvett pontok számának, valamint az éldetektálás használatának határát a mérések pontosságára.

A kutatásaim során használt eszközök: Mitutoyo PJ-A3000 Profil projektor, Optoeye 200 éldetektáló és QM-Data 200 adatfeldolgozó.

# IPARI COMPUTER TOMOGRÁF (CT)

A computer tomográf (CT) egyre elterjedtebben használt mérőeszköz az ipari gyakorlatban. Először anyagvizsgálati feladatokat végeztek rajta, mint öntési hibák, levegő zárványok és nagyobb méretű szennyező anyagok mennyisége az alkatrészekben, majd 2000-es évek második felében a technológiai fejlődés következtében hosszúságok mérésére is elkezdték használni. Számos olyan gépelem van, amelynek méretei roncsolásmentesen nem mérhetőek meg, mint például a nagyon mély és szűk furatok átmérője, beszúrások méretei. Az ipari CT-k alkalmazásával lehetővé vált, hogy ezen méreteket roncsolásmentesen meghatározhassuk. Ma a CT-vel történő hosszmérések 0,01 mm felbontást érnek el, mert a bonyolult mérési eljárás nem teszi lehetővé a pontosabb méret meghatározást [Cantatore és Müller 2011].

A CT rendszer röntgen sugárforrásból, forgóasztalból, egy röntgen detektorból és egy adatfeldolgozó egységből áll, amely számításokat végez, vizualizál és elemzi a mérési adatokat. A CT berendezés felépítése az 1. ábrán látható. A mozgatóegységnek van transzlációs (3,4) és rotációs tengelye (2). A transzlációs tengelyek a vizsgálati tárgy pozícionálására szolgálnak, míg a forgó tengely a mérések alatt forgó tengelyként működik. A transzlációs vagy segédtengelyeken történő mozgatással érhető el, hogy a tárgy geometriai nagyítását a detektorsíkon beállítsuk. A nagyítás mértéke a következőképpen határozható meg:

$$M = \frac{SDD}{SOD}$$

ahol *SDD*: a sugárforrás és detektor távolság (6), *SOD*: a sugárforrás és a vizsgálati tárgy távolsága (5).



1. ábra: Ipari CT-vel történő mérés elve

(1: sugárforrás, 2: forgó tengely, 3: z-tengely, 4: y-tengely, 5: sugárforrás - tárgy távolság (SOD),
6: sugárforrás – detektor távolság (SDD), 7: detektor; 8: szcintillátor vastagsága, 9: pixel magasság, 10: pixel szélesség)

A mérés végrehajtásához a vizsgálati tárgyat általában 360°-ban megforgatjuk a röntgensugárban, és nagy számú egy vagy kétdimenziós képfelvételt készítünk, attól függően, hogy milyen a detektor ill. a sugárforrás.

A CT berendezéssel elkészült 2D képek feldolgozásának első lépése a 3D rekonstrukció, amelynek során a kétdimenziós képekből matematikai algoritmusokkal háromdimenziós térfogatot állítunk elő. A rekonstruált 3D képek voxelekből állnak össze. A voxel a 3D képek elemi része, hasonlóképpen, ahogy a pixel a 2D képek elemi része. A voxelméret függ a 2D képek pixelméretétől, és a *SOD*, *SDD* távolságoktól. A voxel mérete meghatározó a hosszmérések pontosságának az elérésében.

A rekonstrukció során kapott térfogati modellben minden voxelnek lesz egy szürkeségi értéke, amely attól függ, hogy ebben a térfogatelemben mennyi röntgensugárzás nyelődött el. Ezután meg kell határozni, hogy hol található a határvonal, mely voxelek tartoznak a tárgyhoz és melyek tartoznak a háttérhez, a levegőhöz. A küszöbérték (threshold) azt határozza meg, hogy mely szürkeségi értéket tekintjük az egyik vagy a másik anyaghoz tartozónak. A küszöbérték kritikus paraméter a felület határának a meghatározásához, tehát nagy jelentőségű a későbbi geometriai mérések pontosságát illetően.



2. ábra: CT mérési folyamat lépései [11]

A küszöbérték meghatározása után a felület előállítása a következő lépés. A számítógéppel történő felület-meghatározással előállt modellen 3D méréstechnikai módszerekkel méréseket tudunk végezni [10].

A CT-vel történő dimenzionális mérési folyamat lépései a 2. ábrán láthatóak. A mérés nagyon összetett, ezért vizsgálatokat, tervezett kísérleteket végeztem, hogy megállapítsam az egyes lépések befolyásoló hatását a végső mérési eredmény pontosságára, bizonytalanságára [11].

Az ipari CT-vel történő hosszúságméréseket befolyásoló tényezők a mérési folyamat összetettsége miatt számos okra vezethető vissza [VDI 2630, 2010]. A mérésre hatással van a CT berendezés típusa és felépítése (röntgen sugárforrás, tengelyek, detektor és burkolat, 3. ábra); a vizsgálati tárgy és a mérési paraméterek; az elemzési folyamat (rekonstrukciós szoftver és a voxel adatok alapján végzett adatelemzések); a környezeti körülmények (hőmérséklet, páratartalom, rezgések, por); valamint a mérési stratégia és ennek alkalmazása.



3. ábra: A CT berendezés munkaterének elemi és mozgásviszonyai [10]

A kutatásaim során használt eszközök: GE phoenix v|tome|x m mikro-CT; Werth TomoScope HV 500.

# ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

## FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSEK BIZONYTALANSÁGI ÖSSZETEVŐI

#### 1. TÉZIS

Különböző forgácsolási eljárásokkal megmunkált felületek szabvány szerinti szűrt és a szűretlen mikrogeometriai paramétereinek vizsgálata során megállapítottam, hogy a szűretlen (P) profil jellemzőinek használata jobban kifejezi a működő felületek kapcsolatát, ez összhangban van azzal a megállapítással, hogy a felületi érdesség önmagában nem jellemzi a működő, az illeszkedési kapcsolatban résztvevő felületi mikrogeometriát, mivel (a szűrés hatására) jelentősen eltérhet a valós felülettől. [1,2].

# AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETEZÉSE

Vizsgálatainkat számos forgácsolási eljárásra (hosszesztergálás, keresztesztergálás, gyalulás, fúrás, palástmarás, homlokmarás, köszörülés, szuperfiniselés, szikraforgácsolás) kiterjesztettük. Célunk az volt, hogy feltárjuk az egyes megmunkálások mikrogeometriai jellegzetességeit, az érdességi paraméterek egymáshoz való viszonyát, s az adott felületen felvett paraméterek bizonytalanságát.

A méréseket Mahr-Perthometer érdességmérő műszeren végeztük MarSurf XCR-20 kiértékelő szoftverrel. Minden munkadarabon (azonos megmunkálású felületen) 25 szabványos profilmérést végeztünk különböző helyeken. A 25 mérés érdességi (*Ra, Rq stb.*) és a szűretlen profil (*Pa, Pq stb.*) paramétereit (*x<sub>i</sub>*) értékeltük:

max, min,  $\bar{x} = \frac{\sum_{1}^{25} x_i}{25}$ ,  $s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{25} (x_i - \bar{x})^2}{24}}$ ,  $RSD = \frac{s}{\bar{x}}$  % értékek táblázatos megadásával. Az 1. táblázatban éles szerszámmal történt hosszesztergált felület paramétereit láthatjuk.

Érdesség	max [μm]	min [μm]	átlag [µm]	s [μm]	RSD %
Ra	0,254	0,201	0,229	0,018	7,9%
Rq	0,325	0,252	0,292	0,023	7,9%
Rz	1,983	1,358	1,577	0,150	9,5%
Rt	4,794	1,621	2,229	0,651	29,2%
Rp	1,213	0,566	0,726	0,121	16,7%

1. táblázat: Hosszesztergálás éles szerszámmal: v<sub>c</sub>= 250 m/min, a=1,5 mm, f= 0,05 mm/ford.

Az adatokból nagyon jól látszik, hogy bár egy felületet azonos érdességűnek hiszünk, a megmunkálás különböző időpillanataiban a szerszám és a munkadarab érintkezésétől függően mégis jelentős különbözőségek mutatkoznak a paraméterértékek relatív szórás viszonyában. Az általánosan ismert és a géprajzi megadásoknál leggyakrabban alkalmazott *Ra* átlagos

érdességnél 7,9 %, az Rz egyenetlenség-magasságnál 9,5 % a relatív standard bizonytalanság, míg más, ismertebb paraméternél (Rt) - ezen a felületen – akár a 30 %-ot is megközelíti.

Hogy a helyzetet tovább bonyolítsuk, fontos leszögezni a tényt; az egymáshoz kapcsolódó (illeszkedő, elmozduló, súrlódó) alkatrészfelületek nem a szűrt érdességi, R-profil, hanem a szűretlen P-profil mentén érintkeznek egymással. Kézenfekvő tehát, hogy a P-profil paramétereit is vizsgáljuk, összevessük az előzőekkel (2. táblázat).

Szűretlen profil	max [μm]	min [μm]	átlag [µm]	s [μm]	RSD %
Ра	0,425	0,229	0,342	0,048	14,0%
Pq	0,518	0,335	0,427	0,051	11,9%
Pz	2,697	2,024	2,353	0,191	8,1%
Pt	5,015	2,229	2,905	0,574	19,8%
Рр	1,081	0,698	0,822	0,078	9,5%

2. táblázat: Hosszesztergálás éles szerszámmal: v<sub>c</sub>= 250 m/min, a=1,5 mm, f= 0,05 mm/ford.

A 2. táblázat az esztergált felület szűretlen P-paramétereit mutatja. A változékonyság itt már jelentősen nagyobb a *Pa* és *Pq* esetén, mint az R-profilnál. A *Pa* paraméter már 14 %-os relatív szórást mutat, míg a *Pq* paraméter-érték közel 12%-ot. A P-profil magassági paramétereinek növekedési mértéke az R-profilhoz viszonyítva (*Pa, Pz*-nél) megközelíti az 50 %-ot. A forgácsoló megmunkálásoknál a szerszám folyamatosan elhasználódik, így a szerszám éltartama alatt változik a felületi érdesség is. A 3. táblázat kopott szerszámmal végzett megmunkálás paramétereit mutatja be.

Érdesség	max [μm]	min [μm]	átlag [μm]	s [μm]	RSD %	
Ra	0,374	0,289	0,323	0,021	6,5%	
Rq	0,476	0,362	0,407	0,028	6,9%	
Rz	2,650	1,875	2,200	0,177	8,0%	
Rt	4,258	2,097	2,824	0,463	16,4%	
Rp	1,422	0,893	1,091	0,116	10,6%	

3. táblázat: Hosszesztergálás kopott szerszámmal: vc= 250 m/min, a=1,5 mm, f= 0,05 mm/ford.

Az éles szerszámhoz viszonyított *Ra*, illetve *Rz* átlagolt értékei csökkenést mutatnak, ami tovább növeli a bizonytalanságot az adott felület érdességi paraméterértékeinek behatárolásában.

Szűretlen profil	max [μm]	min [μm]	átlag [µm]	s [μm]	RSD %
Ра	0,611	0,359	0,428	0,050	11,7%
Pq	0,744	0,448	0,534	0,059	11,0%
Pz	3,638	2,522	2,975	0,281	9,4%
Pt	4,775	2,894	3,500	0,455	13,0%
Рр	1,524	1,016	1,224	0,126	10,3%

4. táblázat: Hosszesztergálás kopott szerszámmal: vc= 250 m/min, a=1,5 mm, f= 0,05 mm/ford

A 4. táblázatban látható *Pa, Pz* paraméter-értékek az éles szerszámnál mért *Ra*, illetve *Rz* relatív szórás értékei növekedést mutatnak, ami már felveti azt a kérdést is, hogy az érdességi, *R*-paraméterekkel való felületjellemzés, vagy netán a *P*-paraméterek alkalmazása a funkcionális viselkedéshez kapcsolt célravezetőbb út.

Az előzőekhez hasonló helyzetet tapasztalunk szabálytalan élgeometriával, geometriailag nem leírható alakú kemény szemcsékkel forgácsoló eljárásnál, a köszörülésnél. E megmunkálásnál jellegzetesen sztochasztikus felületkép alakul ki, amely a szabályos élgeometriával dolgozó szerszámok (pl. esztergálás, marás) felületképzésének periodikusságától jelentősen eltér. A köszörült felület sok rendszertelen alakú és mélységű vágási karca nagyobb változékonyságot eredményez a felületprofilban.

Az 5. táblázat adatai az *Ra* átlagos érdességnél és az *Rz* egyenetlenség-magasságnál relatív 13,4 %-os standard bizonytalanságot mutatnak, míg *Rt* értékek változékonysága itt 16 %-os. Az *Rz* és az *Ra* között gyakorlati átszámításokra használt az  $Rz = 4,5 \cdot Ra$  képlet, itt az együttható ezt jelentősen meghaladja, átlagos értéke eléri a 7-szeres szorzót.

Érdesség	max [μm]	min [μm]	átlag [µm]	s [μm]	RSD %
Ra	0,76	0,47	0,574	0,077	13,4%
Rq	0,95	0,58	0,725	0,097	13,4%
Rz	5,14	3,16	3,994	0,469	11,7%
Rt	6,90	3,77	5,030	0,804	16,0%
Rp	2,60	1,38	1,783	0,274	15,4%

5. táblázat: Köszörült felület hűtéssel, kiszikráztatással: vc= 50 m/sec, Szilíciumkarbid szemcse

A 6. táblázat a köszörült felület szűretlen *P*-paramétereit mutatja. A *Pa, Pt* paraméter-értékek relatív szórása 13-16 % között mozognak, ami az előírt felületi érdesség gyártásban történő megvalósításánál, a megengedhető határok között való tartásánál jelent komoly feladatokat.

Szűretlen (P)	max [μm]	min [μm]	átlag [µm]	s [μm]	RSD %
Ра	1,15	0,55	0,762	0,166	21,8%
Pq	1,46	0,70	0,950	0,205	21,6%
Pz	7,91	4,08	5,415	1,007	18,6%
Pt	9,08	4,26	6,246	1,170	18,7%
Рр	2,74	1,49	2,047	0,346	16,9%

6. táblázat: Köszörült felület hűtéssel, kiszikráztatással: vc= 50 m/sec, Szilíciumkarbid szemcse

A felületi érdesség mérés kiértékelése, mérési bizonytalansága eltér a méréstechnikában általánosan megszokottól. A felületi érdesség paramétereinek meghatározása során lényeges, hogy az alkatrész felületének mely részén történik maga a mérés, mivel a felület inhomogén jellege jelentős a mérés bizonytalanságához képest. Így a felület, a megmunkálás jellemzésére használt felületi érdességet minél több mérési pont felvételével lehet finomítani, és ezek ingadozása jellemző az adott megmunkálásra elsősorban.



4. ábra: A különféle megmunkálásokkal kapott átlag és relatív standard bizonytalanság értékek P- és Rparaméterekre

Adott megmunkált felület méréstechnikai, gyártási és működési szempontból sem tekinthető homogénnek. A felületet jellemző mikrogeometriai paraméterek jelentős eltérést mutathatnak, a *P* profil ingadozása minden esetben nagyobb, mint az *R* profil esetén, tehát a szűréssel a relatív szórás értékét is csökkentjük, a paraméter átlagos értékén túl (4. ábra).

Gyártásnál és minőségellenőrzésnél mindig figyelemmel kell lenni arra, hogy a felületképzés a forgácsoló szerszám kopási folyamata közben valósul meg, így a szerszám kopása, időbeli változása visszahat a megmunkált felületre.

#### 2. TÉZIS

Forgácsolási eljárással megmunkált felületeken végzett felületi érdességmérésre összeállítottam kísérlettervet azzal a céllal, hogy a felületi érdességmérés bizonytalanságának összetevőit és hatásait vizsgáljam a mérési eredményre vonatkozóan. Megállapítottam, hogy a felületi érdességmérés mérési bizonytalanságának meghatározásához elengedhetetlen az operátor és a munkadarab, az operátor és a helyzet (mérési lokáció) kölcsönhatásának a figyelembevétele, mivel attól függően, hogy melyik érdességi paramétert határozzuk meg, más lesz az egyes faktorok hatása а mérési eredményre. Vizsgálataim eredményeképpen megállapítható, hogy a felületi érdesség és a hullámossági paraméterek mérési folyamatának jellemzésére nem alkalmazható hatékonyan az általánosan használható mérőképesség index. Javaslatom szerint figyelembe kell venni a munkadarabon belüli eltérést, valamint az operátor-munkadarab, és az operátor-helyzet kölcsönhatást is. [3,4]

# AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETEZÉSE

A mérési folyamatok vizsgálata különösen fontos a tömeggyártás ellenőrzésében, az autóipari beszállítók és gyártók esetén. Igazolni kell egy autóipari alkatrész kiválasztott jellemzőjének mérése során, hogy a mérési rendszer (mérőeszköz és a személyzet, környezet) alkalmas a specifikáción belüli vizsgálatra. A szabványos eljárások [ISO 22514-7, MSA és VDA5] nem alkalmazhatók közvetlenül a felületi érdességi paraméterek mérése során, mivel csak felső tűréshatárral rendelkezik a vizsgálandó jellemző, ezért a számítások során az alábbi módosított jellemzőket határoztam meg:

$$GRR\% = \frac{u_{MP}}{\frac{1}{3}(U-\bar{x})} \cdot 100 = \frac{GRR}{\frac{1}{3}(U-\bar{x})} \cdot 100$$

ahol *GRR*: mérőeszköz ismétlőképesség és reprodulkálhatóság (gage repeatability and reproducibility);  $u_{MP}$ : a mérési folyamat eredő standard bizonytalansága; *U*: a méret felső tűréshatára;  $\bar{x}$ : a mért átlagértékek. ([MSA] alapján)

$$Q_{MP} = \frac{k \cdot u_{MP}}{U - \overline{x}} = \frac{U_{MP}}{U - \overline{x}}$$

ahol *k* a kiterjesztési tényező, *U<sub>MP</sub>*: a mérési folyamat kiterjesztett mérési bizonytalansága (*k*=2 esetén közelítőleg 95%-os megbízhatósági valószínűséggel). ([VDA5 és ISO 22514-7] alapján)

A felső határérték a GRR% és a Q<sub>MP</sub> értékekre 30%.

A módosított képességindex:

$$C_{MP} = \frac{6(U - \overline{x})}{3 \cdot u_{MP}}$$

Az [ISO 22514] ajánlása szerint a C<sub>MP</sub> minimális értéke legyen 1,33.

Két autóipari alkatrészt választottunk ki a mérési folyamat bizonytalanságának meghatározása céljából. Mindkét alkatrész porkohászati eljárással készült. A kritikus felületi érdesség és hullámosság paraméterek a 5. ábrán láthatóak.



5. ábra: A kiválasztott autóipari alkatrészek műszaki rajzai

A méréseket Mahr-Perthometer felületi érdességmérő készülékkel végeztük, MFW-250:1 tapintóval és MahrSurf XCR-20 kiértékelő szoftverrel. A beállítási paraméterek a henger esetén: *I=2,4 mm*,  $\lambda_c$ =0,8 mm, a lapát esetén *I=5,6 mm*,  $\lambda_c$ =0,8 mm voltak. A mérések során a következő felületi érdesség és hullámosság paramétereket határoztuk meg: *Ra*, *Rp*, *Wp*; *R*, *Wx*.

Tervezett kísérleteket végeztünk, hogy a mérési folyamat bizonytalanságát okozó tényezők számszerűsíthetőek legyenek. Mindkét alkatrész esetén 10 munkadarabot választottunk a gyártási folyamatból, és minden alkatrészt két személy 3 helyen megmérte, három ismétléssel.

A kapott eredmények értékelése ANOVA módszerrel történt. A mérési eredményekre illesztett ANOVA modell a következő:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{k(j)} + \alpha \beta_{ij} + \alpha \gamma_{k(ij)} + \varepsilon_{l(ijk)}$$

ahol y a mért érték,  $\alpha_i$  az *i*-edik személy véletlen hatása,  $\beta_j$  a *j*-edik alkatrész véletlen hatása,  $\gamma_{k(j)}$  a *k*-adik hely véletlen hatása a *j*-edik darabon belül,  $\varepsilon$  a kísérleti véletlen hiba.

A mérési folyamat eredő standard bizonytalansága, amennyiben a hőmérséklet, linearitás és a stabilitás hatását elhanyagoljuk, a következő:

$$u_{MP} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^{2} + \sigma_{\beta}^{2} + \sigma_{\gamma}^{2} + \sigma_{\alpha\beta}^{2} + \sigma_{\alpha\gamma}^{2} + \sigma_{\varepsilon}^{2}}$$

ahol  $\sigma^2$  az adott variancia-komponens értéke.

A henger és a lapát felületi érdesség és hullámosság mérésének variancia komponensei a 7. táblázatban találhatók A henger autóipari alkatrész méréseinek ANOVA értékelése mutatta, hogy minden hatás szignifikáns 95%-os megbízhatósági valószínűség esetén mindkét mért jellemzőre (*Rp* és *Wp*), kivéve a személy és az alkatrész hatását. Látható az eredményekből, hogy a helynek és a kölcsönhatásoknak nagy hatása van az eredményekre. Hasonló eredmények látunk a lapát mérése esetén is, de a személy hatása a hullámossági paraméter (*Wp* és *Wx*) mérésénél nem elhanyagolható.

	Her	nger	Lapát			
Effect	Rp	Wp	Ra	Wp	R	Wx
Operator ( $\alpha$ )	0,00000	0,00000	0,00001	0,00663	0,00000	0,12477
Part ( $\beta$ )	0,00000	0,00285	0,00073	0,00000	0,00000	0,02893
Place(Part) ()	0,11256	0,01338	0,00878	0,00382	0,02612	0,09175
Operator•Part ( $\alpha\beta$ )	0,04786	0,00756	0,00123	0,00476	0,01090	0,07139
Operator•Place ( $\alpha\gamma$ )	0,00817	0,00874	0,00061	0,00086	0,00133	0,02591
Error (ɛ)	0,04700	0,01442	0,00207	0,00211	0,01569	0,23128

 7. táblázat: A henger és lapát mérésének variancia komponens értékei (μm<sup>2</sup>-ben, a szignifikáns hatások (α=0,05) vastagítottak)

.

A mérési folyamat eredő standard bizonytalansága és a számított képességi paraméterek a hengerre és a lapátra a 8. táblázatban láthatók. Megállapítható, hogy a képességértékek teljesítik a követelményeket a henger esetén, a lapát esetén két paraméterre (*R* és *Wx*) nem.

	Her	iger	Lapát				
	Rp	Wp	Ra	Wp	R	Wx	
и <sub>мР</sub> [μт]	0,4643	0,2010	0,1127	0,1349	0,2324	0,7383	
U [μm]	8	5	2	3	3	6	
$\overline{x}$ [ $\mu$ m]	2,2203	0,2788	0,3480	0,2614	1,466	1,4421	
GRR%	24,10%	13,34%	20,46%	14,77%	45,46%	48,60%	
Q <sub>MP</sub>	16,07%	8,90%	13,64%	9,85%	<b>30,31%</b>	32,40%	
Смр	2,49	4,50	2,93	4,06	1,32	1,23	

8. táblázat: A henger mérési folyamatának képességvizsgálata

A képességvizsgálatok összehasonlítása miatt a relatív variancia komponensek értékei láthatóak az 6. ábrán. Az eredmények mutatják, hogy különbség van az érdességi és a hullámossági paraméterek között. A felületi érdesség mérés esetén a hely relatív varianciája nagyobb, mint a hullámossági paraméter mérése esetén. A felületi érdesség érzékeny a gyártási folyamat (szerszámok vagy a folyamat aktuális állapota) helyi tényezőire, míg a hullámosság inkább a globális tényezőktől (pl. gép rezgése és merevsége) függ. A személyek hatása, amely a reprodukálhatóságra utal, jelentősen kisebb mértékű. A hely hatása és a kölcsönhatások jelentős részét képezik felületi érdesség és hullámosság mérési folyamatának a bizonytalanságában.



6. ábra: A mérési folyamatok relatív variancia (szórásnégyzet) komponens értékei (a hengerre és a lapátra)

# 3. TÉZIS

Kutatásom során a profilprojektorral történő mérés módszertani elemeit vizsgáltam lemezalkatrészeken. Megállapítottam, hogy a mérési módszer (manuális beállítás vagy automatikus optoeye/éldetektálás) szignifikánsan befolyásolja a furatátmérő mérési hibájának értékét és a furatok körkörösségi értékeit. Az átmérő mérési hibája 25 mm érték és e felett állandósul, kisebb átmérők esetén nagyobb a mérési hiba értéke a mérési pontszámtól függetlenül.[5]

# AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETEZÉSE

Egy lemezalkatrészen sokféle méretet, alakot, pozíció és helyzettűrést lehet vizsgálni. A profilprojektorok használatával a lemezalkatrészek 2D-s mérése válik elérhetővé. Az egyik legfontosabb 2D-s geometriai elem a kör, ezért vizsgálataim során kör átmérő és körkörösség mérésének elemzését tűztem ki célul. A profilprojektorral történő pontfelvételeket követően különféle matematikai illesztésekkel határozhatóak meg a kívánt jellemzők:

- legkisebb négyzetek módszere (least square circle, LSC, Gauss módszer)
- minimum zóna módszer (minimum zone circle, MZC, Csebisev módszer)
- legkisebb köréírtható kör (minimum circumscribed circle, MCC)
- legnagyobb beleírható kör (maximum inscribed circle, MIC)

A vizsgálataim során az egyes matematikailag illesztett körök jellemzőit határoztam meg a mérési pontszám és az átmérő függvényében PJ-H3000F profilprojektorral történő mérések során. A vizsgálatokhoz öt különböző átmérőjű (6 mm, 12 mm, 25 mm, 60 mm, 100 mm névleges értékkel) kalibráló gyűrű átmérőjét és körkörösségét határoztam meg háromszor ismételve négyféle matematikai illesztési módszerrel. A körök illesztését 3, 5, 7, 9 és 15 pontra végeztem el.

A kalibráló gyűrűk referencia átmérő értékének meghatározását egy pontosabb gépen végeztem, annak érdekében, hogy az illesztett körök hibáját a lehető legpontosabban mérhessem. A mérés során vizsgáltam, hogy a mérési pontszám és a mért átmérő befolyásolja-e a mérési eredményeket, valamint elemeztem a pontosság, precizitás, megismételhetőség és reprodukálhatóság szempontjából.

Meghatároztam a mérési hiba értékét, és az elemzés során három rögzített faktor szerinti varianciaanalízist végeztem a következő faktorokkal (faktorszintekkel együtt):

- A. módszer (optoeye/éldetektálás vagy manuális)
- B. mérési pontok száma (3, 5, 7, 9, 15)
- C. névleges átmérő (6 mm, 12 mm, 25 mm, 60 mm, 100 mm)

A statisztikai modell:

$$y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{l(ijk)}$$

ahol *i*=1,2; *j*=1,...,5; *k*=1,...,5 és *l*=1,2,3.

A mérési hiba és a körkörösség legkisebb négyzetek módszere szerinti illesztésével kapott eredmények főhatás ábrái az 7. ábrán láthatóak. Az átmérő meghatározása során nagy eltérés mutatkozik a módszer szerint, átlagosan a különbség 0,013 mm, valamint a manuális módszerrel kis mértékű pozitív mérési hibát, az optoeye (éldetektálás) automatikus módszerrel nagyobb mértékű negatív előjelű mérési hibát kapunk. A kölcsönhatás ábráról (8-9. ábra) látszik, hogy ez a hatás minden mérési pontszám esetén fennáll. Látható mindkét módszer használata esetén, hogy a névleges átmérő növekedésével a mérési hiba értéke zérus felé tart.



7. ábra: A LSC illesztéssel számított átmérő és körkörösségi értékek főhatás ábrái



8. ábra: A LSC illesztéssel számított átmérő kölcsönhatás ábrái

Az ANOVA elemzés eredményeit a 9. táblázatban foglaltam össze. A táblázat első négy oszlopa a mérési hibára (átmérő mérés), a második 4 oszlopa a körkörösségi mérésekre vonatkoznak a négyféle matematikai illesztésnek megfelelően. Megállapítható, hogy a módszer és a módszer – névleges átmérő kölcsönhatásnak van a legnagyobb hatása az eredményekre.



9. ábra: A LSC illesztéssel számított körkörösség kölcsönhatás ábrái

9. táblázat: ANOVA elemzés eredményeként kapot	tt szignifikáns hatások (x-s	zel jelölve, α=0,05)	a különböző
mért	jellemzőkre		

	Mérési hiba			Körkörösség				
	LSC	MZC	МІС	мсс	<b>d</b> LSC	<b>d</b> мzc	<b>d</b> мıc	<b>d</b> мсс
(A), Módszer	x	x	x	x	x	x	x	x
(B), Mérési pontok száma			x	x	х	х	х	x
(C), Névleges átmérő			x	x	х	х	х	x
A*B				x	х	х	х	х
A*C	x	x	x	x	x	х	х	x
B*C				x	x	x		
A*B*C					x	х		x
ismétléses szórás [μm]	4,7	5,0	5,1	5,8	2,8	2,3	3,8	3,6

A mérések és az elemzések elvégzése után elmondható, hogy a profilprojektorral történő mérés során a mérési pontszámoknak a köralakúság értékére, míg a mérési hibára a mért átmérőnek van szignifikáns hatása. A legkisebb köré írható köröknél elmondható, hogy minél több pontszámra illesztjük a kört, annál nagyobb lesz az LSC körtől való eltérése.

A vizsgálataim által fény derült a profilprojektorral történő mérési módszer azon tulajdonságára, hogy kis átmérőknél a hiba értéke nagyobb, mint nagy átmérők esetén. Elmondható, hogy 25 mm-es vagy nagyobb átmérők mérésénél és LSC körillesztéssel a hiba értéke 2 mikrométer alatti értéken állandósulni látszik. A profilprojektorral történő átmérő meghatározás során a kiterjesztett mérési bizonytalanság az átmérő függvényében csökkenő tendenciát mutat.

## IPARI CT MÉRÉSI BIZONYTALANSÁGÁNAK FELTÉRKÉPEZÉSE

#### 4. TÉZIS

Ipari CT-vel végzett kísérleti méréseim során a mérési folyamatra és a mérési eredményre hatással lévő tényezőket vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a faktorok, amelyek a CT-vel történő dimenzionális mérés folyamatát befolyásolják nem csak a berendezés paramétereinek a beállításából adódnak, a röntgenfelvételek rekonstrukciója és az azt követő kiértékelés is jelentős hosszméretbeli eltéréseket eredményez. Továbbá az eredményeim alapján kijelenthető, hogy a CT-vel történő hosszúságmérések hibáját a röntgenfelvételek száma nem befolyásolja jelentősen, a nagyítás mértékének csökkentése növeli a síklapúság mérési hibáját, a merőlegességre pedig nincs szignifikáns hatása. [6-10]

## AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETEZÉSE

Az ipari CT berendezésekkel különféle forgácsolt alkatrészek geometriai mérése lehetővé vált az elmúlt évek fejlesztéseinek következtében. A forgácsolt alkatrészek méreteinek tűrése a 0,01-0,003 mm tartományba esik, és ilyen méretekhez kell biztosítani, hogy a roncsolásmentes és gyorsan végrehajtható CT berendezésekkel tudjuk a méreteket meghatározni.

A CT-vel történő mérések során körbeforgatva a vizsgálati tárgyat a berendezésben 500-1500 2D röntgenfelvételt készítenek, amelyekből a rekonstrukció során 3D modellt alkotunk. Meg kell határozni a határfelületet matematikai módon, hogy a későbbi hosszméretek egyértelműen meghatározhatóak legyenek. A threshold érték célszerű megválasztásával tudjuk a felületet meghatározni.

Munkám során egy alumíniumból készült, e kutatáshoz tervezett és gyártott tesztdarab mérését végeztem el ipari CT berendezéssel, és vizsgáltam a rekonstrukciós fázisban a beállítható paraméterek hatását a geometriai mérések alakulására, majd ezt követően a CT szkennelés beállítási paramétereinek hatását a méretek pontosságának vizsgálatára.

Az ipari CT berendezés metrológiai tulajdonságainak vizsgálatára tervezett teszt munkadarab anyaga alumínium, befoglaló mérete 90mm x 90mm x 90mm (10. ábra).

Jelen kutatás során a tesztdarab geometriai formái közül az oldalfelületen levő 14 db 14 mm névleges átmérővel rendelkező furat átmérőjét határoztam meg úgy, hogy a furatokba Gauss módszerrel illesztettem hengert. Kiszámítottam a furatok tengelyeinek metszéspontját a B ill. C bázisfelülettel, és ezen metszéspontok távolságát tekintettem a furatok egymástól való távolságának, amelyeket meghatároztam.



10. ábra. Alumínium vizsgálati tesztdarab a furatok sorszámaival

A CT-vel történő geometriai mérési hibáját határoztam meg, ezért a Bécsi Műszaki Egyetem hosszméréstechnikai nagy precíziós laboratóriumában (TU WIEN, Department for Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology, High Precision Measurement Room – Nanometrology Laboratory) meghatároztuk a furatok referenciának tekinthető méreteit. (10. táblázat)

Furat száma	Névleges érték	Referencia érték	Furat távolsáa	Névleges érték [mm]	Referencia érték
524114	[mm]	[mm]	lavoioug	[]	[mm]
cyl 01	14	13,9865	1-2	22	22,0184
cyl 02	14	13,9725	1-3	44	44,0474
cyl 03	14	13,9836	1-4	30	29,9960
cyl 04	14	13,9930	1-5	50	49,9828
cyl 05	14	13,9945	1-6	35	35,0181
cyl 06	14	13,9880	1-7	59	59,0161
cyl 07	14	13,9668	8-9	22	22,0155
cyl 08	14	13,9927	8-10	44	44,0112
cyl 09	14	13,9891	8-11	30	30,0280
cyl 10	14	13,9782	8-12	50	49,9972
cyl 11	14	13,9904	8-13	35	34,9882
cyl 12	14	13,9799	8-14	59	58,9562
cyl 13	14	13,9609			
cvl 14	14	13 9771			

10. táblázat: Alumínium vizsgálati darab furat átmérő és furat távolság referencia méretei

A dimenzionális mérések alapja, hogy a mérések visszavezethetők legyenek, vagyis etalonhoz képest kell a méreteket meghatározni, beskálázni a kapott felvételeket. Az ipari CT berendezések esetén a kalibrálás még nem kidolgozott, közelítésekkel lehet csak élni. A jelenleg javasolt módszer, hogy lehetőség szerint a CT felvétel az adott testről egy etalonnal együtt történjen. A CT felvétel készítése során a tesztdarab közepén rögzítettük etalonként egy két rubingömböt tartalmazó golyós rudat (ball bart) (11. ábra), amely esetén a két rubingömb közötti távolság kalibrált értéke 15,9329 mm.



11. ábra: Az alumínium mintadarab a golyós rúddal

A CT-vel történő hosszméréseknél tehát az etalonnal történő mérés az első lépés és a kapott mérési eredményeket összevetjük az etalon kalibrálási bizonyítványában szereplő értékkel. Amennyiben ez eltérő, akkor a CT-vel történő mérési folyamat felület meghatározási fázisában korrekciót hajtunk végre, hogy a kapott 3D modellen a kalibrálási bizonyítványban szereplő érték jelenjen meg a CT mérés végeredményeként.

Ezt az adat vagy skála korrekciót golyós rúd (ball bar) felhasználásával végeztem el. Itt ismert a két gömb középpontjának a referencia távolsága, és skála korrekció során a voxel méretet változtatjuk meg a következő szerint:

$$s = s_0 \cdot \frac{d_{\text{Re}f.}}{d_{mért}}$$

ahol so az eredeti voxelméret, s az új voxelméret, d<sub>Ref.</sub> a referencia méret, d<sub>mért</sub> a mért méret.

A rekonstrukcióhoz használt szoftver a VGStudio Max 2.2.2. A rekonstrukció és az illesztések során több paramétert lehet változtatni. Jelen munkában két kísérletsorozatot, valamint az értékelésüket szeretném bemutatni. Az első kísérletsorozat során egy CT felvételt készítettem, és ezt követően a szoftveres kiértékelés paramétereit változtatva vizsgáltam a hatásokat a mérési hiba és bizonytalanság alakulására, a második sorozatban 22 CT szkenneléssel készítettem felvételeket, ahol a paramétereket változtattam, és egyféle szoftveres kiértékeléssel kaptam meg az eredményeket.

#### ELSŐ KÍSÉRLETSOROZAT

Egy CT felvételt készítettem az alumínium munkadarabról, amely során a dimenzionális mérésekhez *GE phoenix v/tome/x m* mikro-CT berendezést használtam. 2024x2024 pixeles detektorral, max. 320 W, 320 kV-os röntgencső. A mérés során használt beállítások: 250 kV, 360 μA, 330 ms-os képfelvétel, binning 1x1, szűrők: 0,5 mm Sn és 0,5 mm Cu, felvett képek száma 1440. Az így elért voxelméret 73,44 μm.

Vizsgálataim során ezt az adott beállítással elkészített CT felvétel rekonstrukcióját tervezetten (11. táblázat) az alábbi faktorok változtatásaival hajtottam végre:

- szoftveres korrekció a háttér sugárzás figyelembevételére a forgatás során (az ún. ROI beállítás figyelembevétele vagy kikapcsolása);
- rubingömbök távolságának meghatározása automata vagy manuális threshold használatával (*Rubin auto thr.* vagy *man. thr.*);
- alumínium részeken levő méretek meghatározásához automatikus vagy manuális threshold használata (*Al auto thr.* vagy *man. thr.*);

Egy adott rekonstruált beállításokkal ismételt méret-meghatározásokat (8-10. mérés) végeztem az illesztés bizonytalanságának meghatározására.

Kísérlet	ROI	Ruby	Al	Kísérlet	ROI	Ruby	Al
1	nem	auto	auto	6	igen	manual	auto
2	igen	auto	auto	7	nem	manual	manual
3	nem	auto	manual	8	igen	manual	manual
4	igen	auto	manual	9	igen	manual	manual
5	nem	manual	auto	10	igen	manual	manual

#### 11. táblázat: Kísérletterv

A vizsgálat során egy szkennelés történt, de a rekonstrukciót 10-szer, a kísérletterv beállításainak megfelelően megismételtem. A furatok átmérői és a furatok egymástól való távolsága került meghatározásra minden esetben, majd a mérési hibát határoztam meg úgy, hogy a mért értékek és a precíziós 3D méréssel meghatározott referencia értékek különbségét vettem. A mérési hiba eredményeit az egyes átmérőkre és furat távolságokra a 12. ábra tartalmazza. Látható, hogy a furat átmérők méretei szoftveres beállítástól függően ± 50 µm-en belül vannak, a furat távolságok esetén ez a tartomány közel ± 100 µm tartományt ölel fel. A furatátmérő névleges értéke 14 mm, a furatok távolságai névlegesen 22 mm és 59 mm között vannak, tehát a távolságok eltérnek, ez okozhatja a mérési hibában való nagy eltérést.



12. ábra: A rekonstrukciós kísérletterv eredményei a furatok átmérő mérésének hibájára, és a furatok távolságmérésének hibájára

A VGStudio Max 2.2 szoftver hosszmérési képességének bizonytalanság értékelésére három ismételt rekonstrukciót végeztem egy beállítás esetén (8-10. kísérlet a 11. táblázatban). Egy faktor szerinti ANOVA eredménye azt mutatta (12. táblázat), hogy van szignifikáns eltérés a 14 furatátmérő és a furat-távolságok között is. Az átmérő mérés ismétléséből eredő standard bizonytalansága 7,44 µm-nek adódott, a távolságok mérés ismétléséből eredő standard bizonytalansága 2,85 µm lett. Ezek a bizonytalanságok csupán az ismételt, ugyanolyan szoftveres beállításból eredő ingadozásból származnak.

12. táblázat: Az ismételt mérések ANOVA elemzése	a fura	t átmérőkre	és a f	furat	távolság	okra
--	--------	-------------	--------	-------	----------	------

Source	DF	Adi SS	Adi MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	<b>F-Value</b>	P-Value
Jellemző	13	0.010311	0.000793	14,33	0,000	Furat táv	11	0,013325	0,001211	148,84	0,000
Error	28	0,001549	0,000055			Error	24	0,000195	0,000008		
Total	41	0,011861				Total	35	0,013521			
Model S	umn	nary				Model S	umm	nary			
	S	R-sq R-sc	adj) R-s	q(pred)			S I	R-sq R-sc	adj) R-s	q(pred)	
0.007439	6 86	94% 8	0.87%	70.61%		0.002853	9 98	56% 9	7 89%	96 75%	

A teljes kísérletsorozat statisztikai kiértékelése 4 rögzített faktor szerinti ANOVA módszerrel történt. A hatásokat kétszeres kölcsönhatásokig vettem figyelemben a modellben. Eredményként elmondható (13. táblázat), hogy a szoftveres beállítás paraméterei szignifikánsan befolyásolják a mérési hiba értékét, mind az átmérő mérés, mind a távolság mérés esetén.

Faktorok	Átmérő mérés	Furat-távolság mérés
Jellemző sorszáma (Ssz.)	x	Х
ROI	x	Х
Rubin threshold	x	х
Al threshold	x	
Ssz. * ROI		х
Ssz. * Rubin		Х
Ssz. * Al		
ROI * Rubin	x	Х
ROI * AI		X
Rubin * Al	x	

#### 13. táblázat: A 4 faktor szerinti ANOVA elemzés eredményeként kapott szignifikáns hatások (x-szel jelölve, α=0,05) a különböző mért jellemzőkre

Az átmérő mérés esetén az Al threshold beállítása szignifikánsan befolyásolja a mérési hiba eredményét, a távolságok esetén ez nem jelentős hatás. Ennek oka, hogy a távolságok számítása és meghatározása sokkal bonyolultabb matematikai és strukturális értelemben.

Az átmérő mérésének ismételt szórása 7,44 μm-nek adódott (12. táblázat), az 4 faktor szerinti ANOVA elemzést követően az összes mérési pont figyelembevételével a mért átmérő mérési hibájának standard bizonytalansága 12 μm lett. Ehhez hasonlóan a távolságok mérésének standard bizonytalansága 2,85 μm-ről megemelkedett 9 μm-re.

A mérési eredmények értékelését követően meghatároztam a legkisebb mérési hibát adó szoftverbeállítást, amellyel a következő kísérletsorozatban, amikor a CT szkennelési paraméterek változtatásának a vizsgálata a cél, a rekonstrukciót el fogom végezni. A beállított értékek a következők: az Al threshold és a Rubin threshold beállítása legyen manuális, és a ROI funkció ne legyen beállítva.

## MÁSODIK KÍSÉRLETSOROZAT

A második kísérletsorozatban a szkennelés három paraméterét választottam ki, amelyek hatását szeretném vizsgálni. A három faktor és a beállítási szintjei a következőek:

- Nagyítás mértéke (M, folytonos változó, SDD: sugárforrás és a detektor távolsága, SOD: sugárforrás és a vizsgálati tárgy távolsága)
  - M=2,72 (SDD=817 mm; SOD=300 mm)
  - M=2,33 (SDD=817 mm; SOD=350 mm)
  - M=2 (SDD=817 mm; SOD=410,3 mm)
- Felvett képek száma (NoV, folytonos változó)
  - o NoV=720 db
  - NoV=1080 db
  - o NoV=1440 db

- Szkennelési paraméterek (SP, a beállításhoz használt hisztogram alakja majdnem azonos a két esetben)
  - $\circ$  level 1: U=250 kV; I=360  $\mu\text{A}$ ; Timing=330 ms; filter 0,5 mm Cu + 0,5 mm Sn
  - $\circ$  level 2: U=280 kV; I=250  $\mu\text{A}$ ; Timing=500 ms; filter 1 mm Cu + 0,5 mm Sn

Összesen 22 szkennelést végeztünk az alumínium munkadarabon a rubin golyós rúddal közösen. Az egyes kísérletek beállításai a 14. táblázatban találhatóak, RSM CCF terv szerint.

A szkenneléseket követően az első kísérletsorozat befejeztével meghatározott szoftver beállításokkal meghatároztam az alábbi paramétereket:

• 14 db furatátmérő értéke (cyl1, cyl2, ..., cyl14)

A függő változó a mérési hiba volt, azaz a mért átmérő érték mínusz a referencia érték.

- Furatok távolságai: (1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 8-9, 8-10, 8-11, 8-12, 8-13, 8-14)
- Síklapúság értékek (A sík, B sík, C sík)
- Merőlegesség értékek (B⊥A, C⊥A)

Standard sorrend	Kísérleti sorrend	Nagyítás (M)	Képek száma (NoV)	Szkennelési paraméterek (SP)
1	2	2.72	720	Level 1
2	8	2.00	720	Level 1
3	1	2.72	1440	Level 1
4	7	2.00	1440	Level 1
5	3	2.72	1080	Level 1
6	9	2.00	1080	Level 1
7	13	2.33	720	Level 1
8	18	2.33	1440	Level 1
9	19	2.33	1080	Level 1
10	12	2.33	1080	Level 1
11	20	2.33	1080	Level 1
12	21	2.72	720	Level 2
13	5	2.00	720	Level 2
14	11	2.72	1440	Level 2
15	10	2.00	1440	Level 2
16	15	2.72	1080	Level 2
17	4	2.00	1080	Level 2
18	14	2.33	720	Level 2
19	6	2.33	1440	Level 2
20	16	2.33	1080	Level 2
21	22	2.33	1080	Level 2
22	17	2.33	1080	Level 2

#### 14. táblázat: RSM kísérletterv a szkennelési paraméterek vizsgálatára

A méretek meghatározását követően kiszámítottam a mérési hibát (mért távolság érték mínusz a referencia értéke), és a következő fenomenológiai modell szerint végeztem a statisztikai elemzést:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot M + \beta_2 \cdot NoV + \beta_3 \cdot SP + \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot M \cdot NoV +$$
(1)  
+  $\beta_1 \cdot \beta_3 \cdot M \cdot SP + \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot NoV \cdot SP + \beta_{11} \cdot M^2 + \beta_{22} \cdot NoV^2 + \varepsilon$ 

ahol Y a mérési hiba ill. az alakeltérés, M a nagyítás, NoV a felvett képek száma és SP a szkennelési paraméterek.

ANOVA elemzést végeztem el, hogy meghatározzam a jelentős tényezőket 0,05-ös szignifikancia szinten. Az eredmények, amely esetben szignifikáns hatás mutatható ki, a 15. táblázatban találhatók. Ez azt mutatja, hogy a furat átmérő meghatározása esetén nincs egyik faktornak sem hatása a mérési hiba értékére, csak az 1-es furatátmérő esetén. Ennek az az oka, hogy a mérés ismétlőképessége és bizonytalansága összevethető mértékű a faktorok esetleges hatásaival.

Az eredmények azt is mutatják, hogy a nagyítás faktornak szignifikáns hatása van a síklapúság értékére mindhárom (A, B és C) felület esetén. A felvett képek száma néhány esetben a furattávolságok esetén szignifikáns hatást mutatnak.

Jellemző	М	NoV	SP	M∙NoV	M·SP	NoV∙SP	М∙М	NoV·NoV	SP·SP
Cyl 1						x			
Síklapúság (A)	х						х		
Síklapúság (B)	х						х		
Síklapúság (C)	х						х		
C⊥A				х		x			
1-2					х				
1-4				х					
1-5			x						
1-6			x			x	x		
1-7			x						

15. táblázat: RSM kísérletterv eredményeinek szignifikáns hatásai x-szel jelölve

Az ismételt mérések szórása a modellben a 16. táblázatban található. Látható, hogy a furatátmérő értékének a legkisebb a bizonytalansága, ezt követi a furattávolságok és a síklapúság mérési bizonytalansága. A legnagyobb mértékben a merőlegesség mérési bizonytalansága mutatkozik.

Furat	Névleges	ism. szórás	Furat	Névleges érték	ism. szórás	Alakeltérés	ism. szórás
száma	érték	[mm]	távolság	[ <i>mm</i> ]	[ <i>mm</i> ]		[mm]
	[mm]						
cyl 01	14	0,0035	1-2	22	0,054	Síklapúság A	0,0044
cyl 02	14	0,0085	1-3	44	0,021	Síklapúság B	0,023
cyl 03	14	0,012	1-4	30	0,029	Síklapúság C	0,025
cyl 04	14	0,015	1-5	50	0,024	B⊥A	0,073
cyl 05	14	0,014	1-6	35	0,028	C⊥A	0,085
cyl 06	14	0,0087	1-7	59	0,014		
cyl 07	14	0,013	8-9	22	0,053		
cyl 08	14	0,015	8-10	44	0,029		
cyl 09	14	0,012	8-11	30	0,035		
cyl 10	14	0,015	8-12	50	0,027		
cyl 11	14	0,014	8-13	35	0,033		
cyl 12	14	0,015	8-14	59	0,023		
cyl 13	14	0,015					
cyl 14	14	0,017					

#### 16. táblázat: Az egyesített szórás (standard mérési bizonytalanság) értéke az RSM kísérletterv mérései során

# 5. TÉZIS

Ipari CT-vel történő dimenzionális méréseim során vizsgáltam több anyagból álló munkadarab geometriai jellemzőinek értékeit. A vizsgálat során terveztem egy kétféle anyagból (alumínium és polioximetilén, POM) álló olyan munkadarabot, amelyet külön és egyben is lehetett szkennelni, és meghatározni a furat/csap átmérő értékeket. Megállapítottam, hogy szignifikánsan befolyásolta a CT-vel történő furat átmérő mérést az, hogy a vizsgálati darab alumínium furataiban benne voltak a POM csapok vagy sem, a mérési hiba jelentősen megnőtt a két anyag együttes vizsgálatával. [11]

# AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETEZÉSE

A CT-vel történő dimenzionális méréseket, vizsgálatokat először egyetlen anyagból készült munkadarab méreteinek a meghatározásával kezdtem. A képfeldolgozási eljárás során nehézségeket jelent, ha nem a levegő és az anyag, hanem két különféle anyag (pl. fém és műanyag) határát kell meghatározni a CT-a vizsgálat alkalmával. Célom volt a CT-s méréseknél egy olyan vizsgálat elvégzése, melyből következtetni tudok olyan CT-s dimenzionális mérések pontosságára és a mérés bizonytalanságára, melynél egy fém és polimer térfogaton belüli határfelületén kell méréseket végezni.

Vizsgálati mintadarabot terveztünk, ahol az anyag kiválasztásánál az volt a fő szempont, hogy kétféle anyagból legyen a darab, melyeket egyszerre és külön szkennelve CT-vel is lehet vizsgálni (13. ábra). A kétféle anyag: AlMgSi1 és POM (polioximetilén) műszaki műanyag volt. Az alumíniumból kivágtunk egy kisebb téglatestet, melyen 3 db átmérő 15 mm-es és 3 db átmérő 20 mm-es H7-es dörzsárazott furat volt. A műanyag csapok tervezésénél a fő szempont az volt, hogy az alumínium test furatokba helyezett POM csapok esetén az illesztési rés kicsi legyen, de ugyanakkor ne legyen átfedés. A tűrést így 0/-0,03 mm-re vettük, mely az esztergálás során még legyártható. A referenciaméréseket az Óbudai Egyetem hosszméréstechnikai laborjában végeztük el kalibrált Mitutoyo Crysta Plus 544 koordináta mérőgéppel.



13. ábra: A vizsgálati darab és a mérés során felhasznált ball bar etalon befogva a 3D nyomtatott tartóba

A vizsgálatok során két típusú CT berendezést használtunk:

- GE phoenix v|tome|x m (Continental Hungary Kft.)
- Werth HV-500 (Enerswiss Magyarország)

A CT beállítási paraméterei a 17. táblázatban találhatóak.

СТ	Anyagok	U [kV]	Ι [μΑ]	t <sub>exp</sub> [ms]	NoV. [db]
GE	Al	280	260	500	1800
	РОМ	250	250	500	1620
	Al+POM	280	260	500	1800
Werth	Al	190	450	1000	800
	POM	120	250	1000	800
	AI+POM	190	450	1000	800

#### 17. táblázat: CT-k mérési beállításai

A dimenzionális méréseket a Kotem Smartprofile szoftverével készítettük el. Az STL fájlokat, mint mért pontfelhőt be lehet hívni és az előzőleg, a névleges CAD modellre felépített kiértékelési stratégia szerint ki lehet értékeltetni. A kiértékelés során a furatok és a csapok hengerességét és átmérőjét vizsgáltuk. Az illesztési módszer az alumínium darab esetén LSC (legkisebb négyzetes eltérések módszere) és a legnagyobb belső burkolóelem (MCC) volt, a POM csap esetén LSC és a legkisebb külső burkolóelemmel (MIC) való illesztést használtuk.

A 6-os POM csapot megmértem mind a két CT berendezéssel háromszor, így a gépek ismétlőképességére tudok következtetni. A mért eredményekből kiszámoltam a mérési hibát, vagyis a CT-vel mért érték és a CMM-mel történt referencia mért érték különbségét. Elvégeztem a varianciaanalízist, melynek a főhatás-ábrája a 14. ábrán látható. A varianciaanalízis során arra keressük a választ, hogy a mérés során mely faktornak, faktoroknak van hatása a mérési hibára. A mérési hibára nézve a mérőgép, a mérési pontok száma és az illesztés faktorokat vizsgáltam. A mérőgépet 2 szinten (GE vagy Werth), a mérési pontok számát 3 szinten (18, 36 vagy 72 pont), az illesztéseket 2 szinten (LSC vagy MCC) vizsgáltam.

Az ANOVA eredményeként elmondható, hogy a mérőgépnek és az illesztésnek szignifikáns hatása van 5%-os szignifikancia szinten, valamint a mérőgép és a mérési pontok kölcsönhatása jelentős mértékű (15. ábra).







15. ábra: A 6-os POM csap mérésének kölcsönhatás ábrája

Az alumínium test mérését szintén kétféle CT berendezéssel végeztem el, faktorok, melyeket a mérés során több szinten változtattam:

- furat átmérő (15 mm vagy 20 mm)
- mérőgép (GE vagy Werth)
- mérési pontok száma (18, 36 vagy 72)
- illesztési módszer (LSC vagy MIC).

Az ANOVA eredményei mutatták, hogy szignifikáns hatása van (5%-os szignifikancia szinten) a CT berendezésnek, az illesztési módszernek, kölcsönhatása van a CT-nek és a vizsgált átmérőnek, a CT-nek és az illesztésnek, valamint a mérési pontok számának és az illesztésnek. Ezeket a hatásokat a főhatás-ábrán (16. ábra) vizuálisan is megjelenítettem. A főhatás ábrából jól látszik, hogy a referenciaméretekhez képest a CT berendezések mérési eredményei alábecsülik a furatok átmérőjét.



16. ábra: Az alumínium darab mérésének főhatás ábrája

A vizsgálati darabokat úgy is megmértem CT-vel, hogy a POM csapok benne voltak az alumínium test furataiban. A mérés során, hogy a kiértékelési metódus (kiértékelő szoftver és módszer) ne változzon a darabok egyenkénti mérésétől, STL-t generáltattam a mérőszoftverrel, de a szoftver olyan esetben, amikor egyszerre többféle sugárelnyelési tényezőjű anyagot szkennelünk, akkor csak a legmagasabb rendszámú anyagról készít STL-t, illetve határozza meg a külső, burkolófelületét.

Az összes mérési eredmény, a 17. ábrán látható. Az ábrából jól kitűnik, hogy az egyben és a külön mért vizsgálati darab mérési eredményei elkülönülnek egymástól. A mérési elrendezésnek - tehát, hogy egyben vagy külön mértem meg a CT-vel a vizsgálati darabot - van a legnagyobb hatása, mely a főhatás ábrából (18. ábra) jól látható.



17. ábra: A Werth CT-vel egyben és külön mért alumínium darab mérési eredményei grafikusan

Az eltérést a küszöbérték (threshold) felvétele jelentette, hiszen amikor az alumínium darabot csak magában mértem CT-vel, akkor csak a levegő és az alumínium között kellett a szoftvernek a küszöbértéket kiszámolnia, a POM csapokkal együtt történő mérés során pedig a furatok falainál már a levegőnél nagyobb rendszámú anyag volt jelen. A POM csapok az alumínium darab furatainak falánál megnehezítették a szoftver számára az alumínium darab felületének meghatározását azáltal, hogy a küszöbérték meghatározásakor a két anyag sugárelnyelési tényezője kisebb mértékben különbözött.



18. ábra: A Werth CT-vel egyben és külön mért alumínium darab mérésének főhatás-ábrája

A 6-os számú POM csapot a vizsgálat során megmértem mindkét CT berendezéssel többször ismételve, így ezekből az adatokból ki lehet számolni a két CT berendezés mérési bizonytalanságát erre a mérési feladatra vonatkozóan. A számítás levezetését mellőzve a kiterjesztett, közelítőleg 95%-os megbízhatósági valószínűségű bizonytalanság értéke az egyes berendezésekre:

• 
$$U_{Werth} = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} = 0,0095 \ mm;$$

• 
$$U_{GE} = 0,091 mm.$$

A két eredményből látható, hogy a Werth CT mérési bizonytalansága jóval kisebb, mint a GE CT-nek.

A vizsgálatom eredményei:

- a vizsgált két különböző gyártmányú CT mérési bizonytalansága nagyban eltér, a GE CT mérési bizonytalansága nagyobb, mint a Werth gyártmányúé, műanyag (POM) csap mérése esetén,
- szignifikáns hatása van az illesztési módszernek a csap és a furatos alumínium darab esetén is, tehát nem mindegy, hogy milyen illesztési módszert használunk,
- a mérési pontszámnak nincs szignifikáns hatása sem a csapok, sem a furatok mérése esetén,
- szignifikánsan befolyásolta a mérést az, hogy a vizsgálati darab alumínium furataiban benne voltak a POM csapok vagy sem.

# A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA

A tézisekhez kapcsolódó publikációk hatását a hivatkozásokon keresztül mutatom be.

A felületi érdesség mérési bizonytalanság meghatározásával kapcsolatos 4 publikáció összesen 24 független hivatkozást kapott, amelyből 9 cikk WoS/Scopus által jegyzett.

Az ipari CT dimenzionális mérésével kapcsolatos kutatások 6 publikációban szerepelnek, amelyek 25 független hivatkozást kaptak, amelyből 23 WoS/Scopusban jegyzett.

A kutatásaim jelentős részét képezik az alkalmazott statisztikai módszerek használata az eredmények kiértékelésében. Ezen publikációimra a módszerrel kapcsolatosan számos hivatkozás és visszajelzés érkezett. A további tudományos közlemények között szereplő publikációimra összesen 164 hivatkozás érkezett, amelyből 126 WoS/Scopus által jegyzett.

A tézisfüzetben szereplő publikációim összegzett impakt faktora 8,085.

A Tudományos Diákköri Konferencia keretén belül több hallgatóm sikereket ért el az országos megmérettetésen a hosszmérések bizonytalanságainak a feltérképezése témakörében.

- Rácz Péter: Mérőrendszer fejlesztése és eredményességének bizonyítása minőségszabályozási módszerekkel, 2016. **OTDK II. helyezett**
- Nagy Júlia: Csuklókaros koordináta mérőgép bizonytalanságának meghatározása, 2014 OTDK Különdíj
- Marczis Attila: Köralak metrológiai vizsgálata profilprojektorral történő mérések során, 2014 – OTDK II. helyezett
- Fülöp Daniella, Nagy Júlia: Bizonytalanságok a hosszméréstechnikában, 2012 OTDK I. helyezett.

A CT-vel történő kutatások során lehetőségem nyílt arra, hogy a Bécsi Műszaki Egyetemen tölthessek CEEPUS ösztöndíjasként gyakorlatot a hosszméréstechnikai laboratóriumban. Ennek eredménye közös munkában nyilvánult meg, és az általuk szervezett konferencián kedvező értékelést kapott a munkánk. Az IMEKO (International Measurement Confederation) szakmai tagjaként lehetőségem van a kutatásaimról a hosszmérésekkel foglalkozó TC 13 csoport által szervezett konferenciákon megvitatni, amelyekről pozitív hozzászólásokkal jöhettem haza.

A CT-vel történő kutatásaimnak köszönhetően részt vehettem egy nemzetközi körmérésben, amelynek eredményét közösen publikáltuk. A körmérést a Stellenbosch Egyetem (Dél-afrikai Köztársaság) szervezte, a résztvevő egyetemek: Department of Mechanical Engineering, KU Leuven, Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Laboratory of Industrial Tomography, National Centre for Nuclear Research, Poland; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, German az Óbudai Egyetem mellett. A CT-vel történő dimenzionális mérések az ipari gyakorlatban is egyre jobban előtérbe kerülnek, és sok helyen már sorozatmérésekre is használják az autóiparban. Az eredményeim alapján az ipari kapcsolataim megerősödtek a közelmúltban ezen a területen (Werth Magyarország, Continental, NIDEC).

Az eredmények alapján egy PhD kutatási témát indítottam additív gyártástechnológiai folyamat ipari CT alapú optimalizálása témájában 2022 szeptemberétől.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

[Bartscher et al., 2016] Bartscher, M., Illemann, J., & Neuschaefer-Rube, U. (2016). ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography. Case studies in nondestructive testing and evaluation, 6, 79-92.

[Carmignato et al., 2018] Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.). (2018). Industrial X-ray computed tomography. Springer.

[Cantatore és Müller, 2011] Cantatore, A., & Müller, P. (2011). Introduction to computed tomography. Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering.

[Farago és Curtis, 2007] Farago, Francis T., and Mark A. Curtis. (2007): Handbook of dimensional measurement, Industrial Press, New York, USA

[GUM, 2008] GUM: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008, (GUM 1995 with minor corrections)

[He et al.,2015] He, Z., Fu, J., Zhang, L., & Yao, X. (2015). A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 88, 1-8.

[Hiller és Hornberger, 2016] Hiller, J., & Hornberger, P. (2016). Measurement accuracy in X-ray computed tomography metrology: Toward a systematic analysis of interference effects in tomographic imaging. Precision Engineering, 45, 18-32.

[Myer és Montgomery, 2002] Myer, R. H., & Montgomery, D. C. (2002). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiment. John Wiley and Sons, New York.

[Montgomery, 2017] Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.

[Schwenke et al., 2005] Schwenke, H., Franke, M., Hannaford, J., & Kunzmann, H. (2005). Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54(1), 475-478.

[Sladek és Gaska, 2012] Sładek, J., & Gąska, A. (2012). Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method. Measurement, 45(6), 1564-1575.

[Taguchi et al., 2005] Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). Taguchi's quality engineering handbook (Vol. 1736). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[VDI 2630, 2010] VDI/VDE 2630 Part 1.2: Computed tomography in dimensional measurement -Influencing variables on measurement results and recommendations for computed-tomography dimensional measurements, 2010

[VIM3, 2012] VIM: International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections)

[Weckenmann et al., 2001] Weckenmann, A., Knauer, M., & Killmaier, T. (2001). Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry. Journal of materials processing technology, 115(1), 9-13.

[Wilhelm et al., 2001] Wilhelm, R. G., Hocken, R., & Schwenke, H. (2001). Task specific uncertainty in coordinate measurement. CIRP annals, 50(2), 553-563.

[ISO 22514-7] ISO 22514-7, "Statistical methods in process management - Capability and performance – Capability of measurement processes", 2012

[MSA] Measurement System Analysis, 4th Edition, 2010

[VDA5] VDA 5, "Prüfprozesseignung", 2nd Edition, 2010

## A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [1] Tóth G N, Drégelyi-Kiss Á, Palásti-Kovács B: Analysis of the microgeometric parameters of cut surfaces, POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 8:(02) pp. 55-66. (2013)
- [2] Drégelyi-Kiss, Á; Horváth, A: Investigations on the accuracy of additive and conventional manufacturing, IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 393 Paper: 012098, 6 p. (2018)
- [3] Drégelyi-Kiss Á, Czifra Á: Measurement uncertainty and gauge capability of surface roughness measurements in the automotive industry: a case study, SURFACE TOPOGRAPHY: METROLOGY AND PROPERTIES 2: Paper 034001. 7 p. (2014)
- [4] Farkas, G ; **Drégelyi-Kiss, Á**: Measurement uncertainty of surface roughness measurement IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 448 p. 012020 (2018)
- [5] Marczis A, Drégelyi-Kiss Á: Determination of the number of measurement points in case of sheetmetal parts, In: W Zebala , I Mankova (szerk.) Development in Machining Technology Vol. 6.. Cracow: Cracow University of Technology Press, 2016. pp. 66-75. (ISBN:978-80-553-2576-7)
- [6] Dregelyi-Kiss, A; N M, Durakbasa: Measurement Error on the Reconstruction Step in Case of Industrial Computed Tomograph, In: Numan, M Durakbasa; M, Günes Gencyilmaz (szerk.) ISPR 2018, Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018, Cham (Németország), Németország: Springer International Publishing AG, (2019) pp. 309-323., 15 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92267-6\_27
- [7] Drégelyi-Kiss, Ágota: Towards Traceable Dimensional Measurements by Micro Computed Tomography In: Durakbasa, Numan; Majstorovic, Vidosav D. Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue Bécs, Ausztria : Springer International Publishing (2019) pp. 247-254. Paper: Chapter 23, 8 p. DOI: 10.1007/978-3-030-18177-2\_23
- [8] Plessis, Anton du ; le Roux, Stephan G. ; Waller, Jess ; Sperling, Philip ; Achilles, Nils ; Beerlink, Andre ; Métayer, Jean-François ; Sinico, Mirko ; Probst, Gabriel ; Dewulf, Wim ; Drégelyi-Kiss, Ágota et al.: Laboratory X-ray tomography for metal additive manufacturing: round robin test , ADDITIVE MANUFACTURING 1 : 1 p. 100837 Paper: 100837 (2019)
- [9] Dao, Anh; Drégelyi-Kiss, Ágota: Determination of GD&T Features Varying the Setting Parameters of X-Ray Computed Tomography by Response Surface Method, MATERIALS SCIENCE FORUM 994 pp. 280-287., 8 p. (2020)
- [10] Drégelyi-Kiss Á: Ipari CT hosszmérési folyamatának elemzése, GÉP 69 : 1 pp. 30-35. , 6 p. (2018)
- [11] Drégelyi-Kiss, Á ; Marczis, A: Distance measurements on compound workpiece with industrial computed tomography, IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 426 pp. 1-8. Paper: 012009, 8 p. (2018)

#### TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [12] Drégelyi-Kiss Ágota, Horváth Richárd, Mikó Balázs: Design of experiments (DOE) in investigation of cutting technologies, In: Zebala W, Mankova I (szerk.) Development in Machining Technology Vol.3. Cracow: Cracow University of Technology Press, 2013. pp. 20-34. (ISBN:978-83-7242-697-0)
- [13] Mikó B , Palásti-Kovács B , Sipos S , Drégelyi-Kiss Á: Investigation of cutting edge preparation for twist drills, INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINING AND MACHINABILITY OF MATERIALS (IJMMM) 17:(6) pp. 529-542. (2015)
- [14] Drégelyi-Kiss Á, Horváth R: Examination of Aluminum fine turning process with Taguchi method, In: J Holub (szerk.) XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry": Prague, 2015. Paper P 128. 4 p.
- [15] Horváth R, Drégelyi-Kiss Á, Mátyási Gy: Application of RSM Method for the Examination of Diamond Tools, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 11:(2) pp. 137-147. (2014)
- [16] Horváth Richárd, Drégelyi-Kiss Ágota: Analysis of surface roughness of aluminium alloys fine turned: united phenomenological models and multi-performance optimization, MEASUREMENT 65: pp. 181-192. (2015)
- [17] Mózes A, Drégelyi-Kiss Á: Dudorhegesztési folyamat többváltozós optimalizálása kísérlettervezéssel, GÉP 57:(4) pp. 38-44. (2016)
- [18] Mikó, Balázs; Manó Szabó, Soma ; Drégelyi-Kiss, Ágota: Application of a Genetic Algorithm for Minimum Zone Method of Flatness, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 3 pp. 107-126., 20 p. (2021)
- [19] Drégelyi-Kiss Á: Performance verification of dimensional measuring instruments in automotive industry, In: Molnár P (szerk.) Proceedings of First International Academy for Quality World Quality Forum (IAQ- WQF) Budapest: EOQ MNB, 2015. Paper D4.2. 6 p.
- [20] Patil Pankaj N, Gogate Parag R, Csoka Levente, Dregelyi-Kiss Agota, Horvath Miklos: Intensification of Biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation ULTRASONICS SONOCHEMISTRY 30: pp. 79-86. (2016)
- [21] Kozma K, Puskás J, Drégelyi-Kiss Á: The changes in precipitation during 124 years and its influences on the physical conditions of Hernád River, APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH 12:(2) pp. 523-536. (2014)
- [22] Mónika Bakosné Diószegi, Miklós Horváth, Ágota Drégelyi-Kiss: Experimental Design and Study of Shear Technology for Biomass Comminuting, APPLIED MECHANICS AND MATERIALS 564: pp. 555-559. (2014)