



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY



ÓBUDAI EGYETEM
BÁNKI DONÁT GÉPÉSZ ÉS
BIZTONSÁGTECHNIKAI MÉRNÖKI KAR

A felületi minőség hatása az ipari CT mérési pontosságára

Lóránd Áron

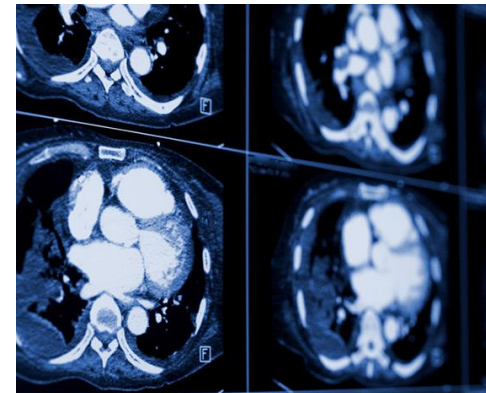
Témavezető: Dr. Drégelyi-Kiss Ágota

Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

2025. 01. 23.

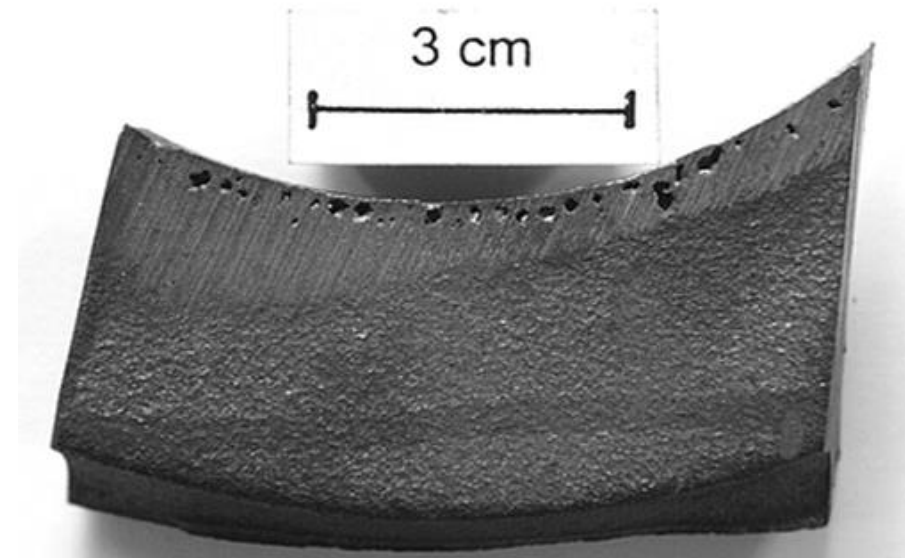
Miért foglalkozom a témával?

- 3D nyomtatás (additív gyártás) egyre népszerűbb, tömeggyártás
- Méretellőrzésre CMM mellett már CT is használható
 - Egyszerűbb és gyorsabb mérés
 - Nem kell programozni, könnyebben automatizálható
 - Így az Ipar 4.0 keretében zajló digitalizációra egy lehetőség
- Összetett mérési folyamat, sok tényező befolyásolja a mérést
- Mérési bizonytalansága nem meghatározott



A CT helye az iparban

- Egyre elterjedtebbé válik az iparban mint mérőeszköz
- Először: anyagvizsgálatra (öntési hibák, levegőzárványok, szennyezők kimutatása)
- 2010-es évektől: már dimenzionális mérésekre is alkalmas
- Cél: metrológiaivá tenni



Mérési hiba, mérési bizonytalanság



Cél: Pontos, megbízható és reprodukálható mérési eredmények

Mérési hiba:

a mért mennyiségérték mínusz a referencia mennyiségérték

Mérési bizonytalanság:

nem-negatív paraméter, amely a mérendő mennyiségnek a felhasznált információ alapján tulajdonított mennyiségértékek szóródását jellemzi

Rendszeres hiba:

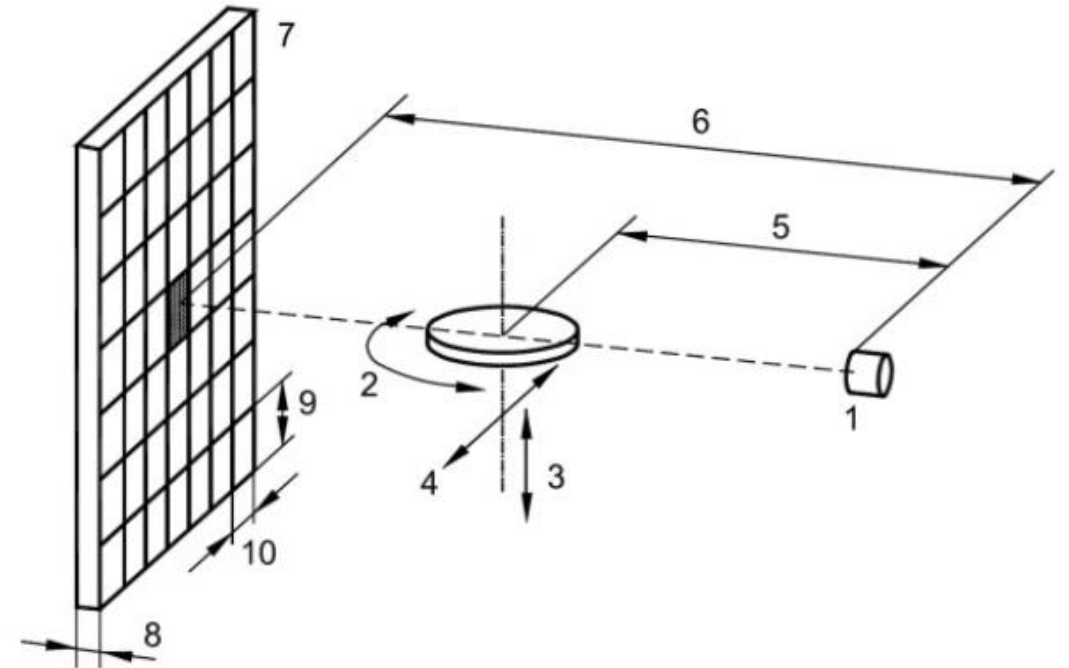
a mérési hiba összetevője, amely ismételt mérések esetén állandó marad, vagy előrelátható módon változik

Véletlen hiba:

a mérési hiba összetevője, amely ismételt mérések esetén előre nem látható módon változik

A CT-s mérések elve

1. Röntgensugár-forrás
2. Forgatás tengelye
3. z-tengely
4. y-tengely
5. SOD (forrás-minta távolság)
6. SDD (forrás-detektor távolság)
7. Detektor
8. Szcintillációs ernyő vastagsága
9. Pixel magassága
10. Pixel szélessége



$$M = \frac{SOD}{SDD} \text{ nagyítási tényező}$$

CT-s hossz mérés folyamata



- Adatmérés
 - A minta 360°-os forgatása
 - 2D képek rögzítése
- Adatfeldolgozás
 - 3D térfogat rekonstrukció (voxel = volume pixel)
 - A voxel mérete függ: M, 2D pixelméret
 - n bites szürkeségi skála => 2^n szürkeségi index (a pixelek szürkeségi tartománya)
 - Az elnyelt sugárzás mennyisége alapján
 - A határvonal meghatározása (melyik voxel tartozik anyaghoz, melyik a levegőhöz -> szürkeségi index küszöbértéke alapján)
- Eredmény: 3D adatmátrix
- Mérés: vonal, sík stb. illesztése (ahogy CMM-nél)
- Eredmény: méret (hossz, átmérő), GD&T paraméterek (körkörösség, hengeresség stb.)

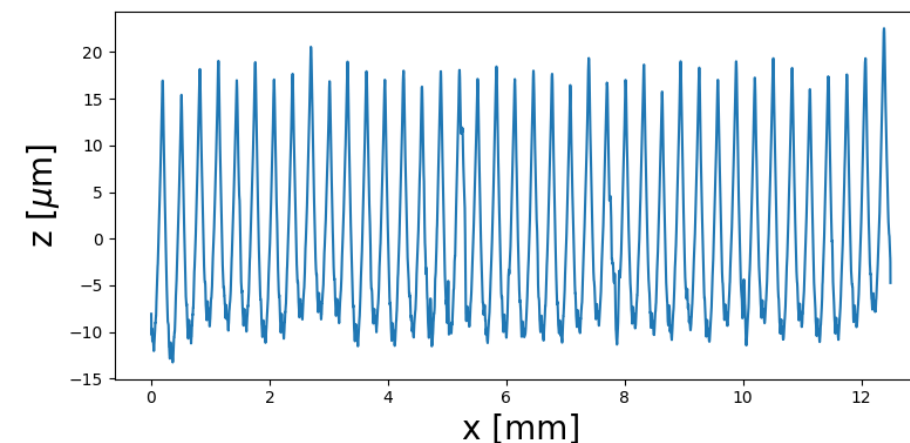
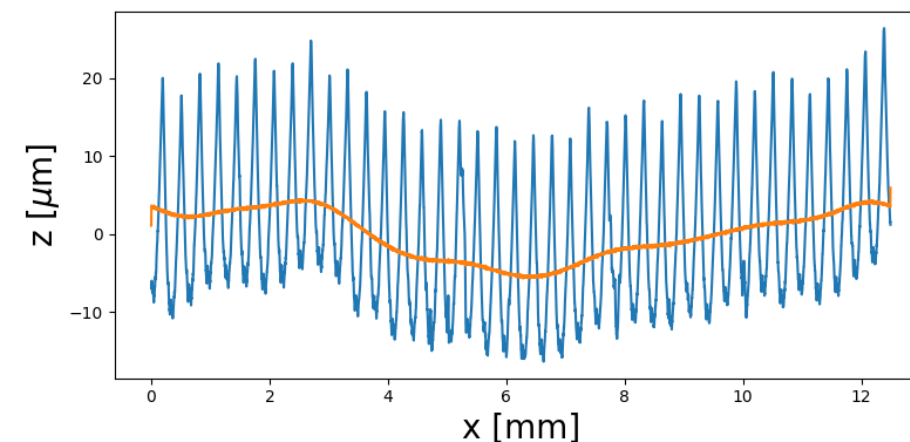
Mérést befolyásoló tényezők



- $R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)| dx$; átlagos érdesség
- $R_v = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \max_{j \in N_i} (Z_{vd,j})$, $R_p = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \max_{j \in N_i} (Z_{ph,j})$, $Z_{ph,j}$: a j -edik csúcs magassága, n_{sc} : szekciók száma, $N_i = \{j = 1, 2, \dots, n_v \text{ vagy } n_p \mid (i-1)l_{sc} \leq x_j < il_{sc}\}$, n_p, n_v : csúcsok (peaks) vagy völgyek (pits) száma, x_j : a j -edik profilcsúcs vagy -völgy pozíciója az x -tengelyen; átlagos völgymélység, átlagos csúcsmagasság
- $R_z = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} (\max_{j \in N_i} (Z_{vd,j}) + \max_{k \in N_i} (Z_{ph,k}))$; maximum magasság (átlagos érték)

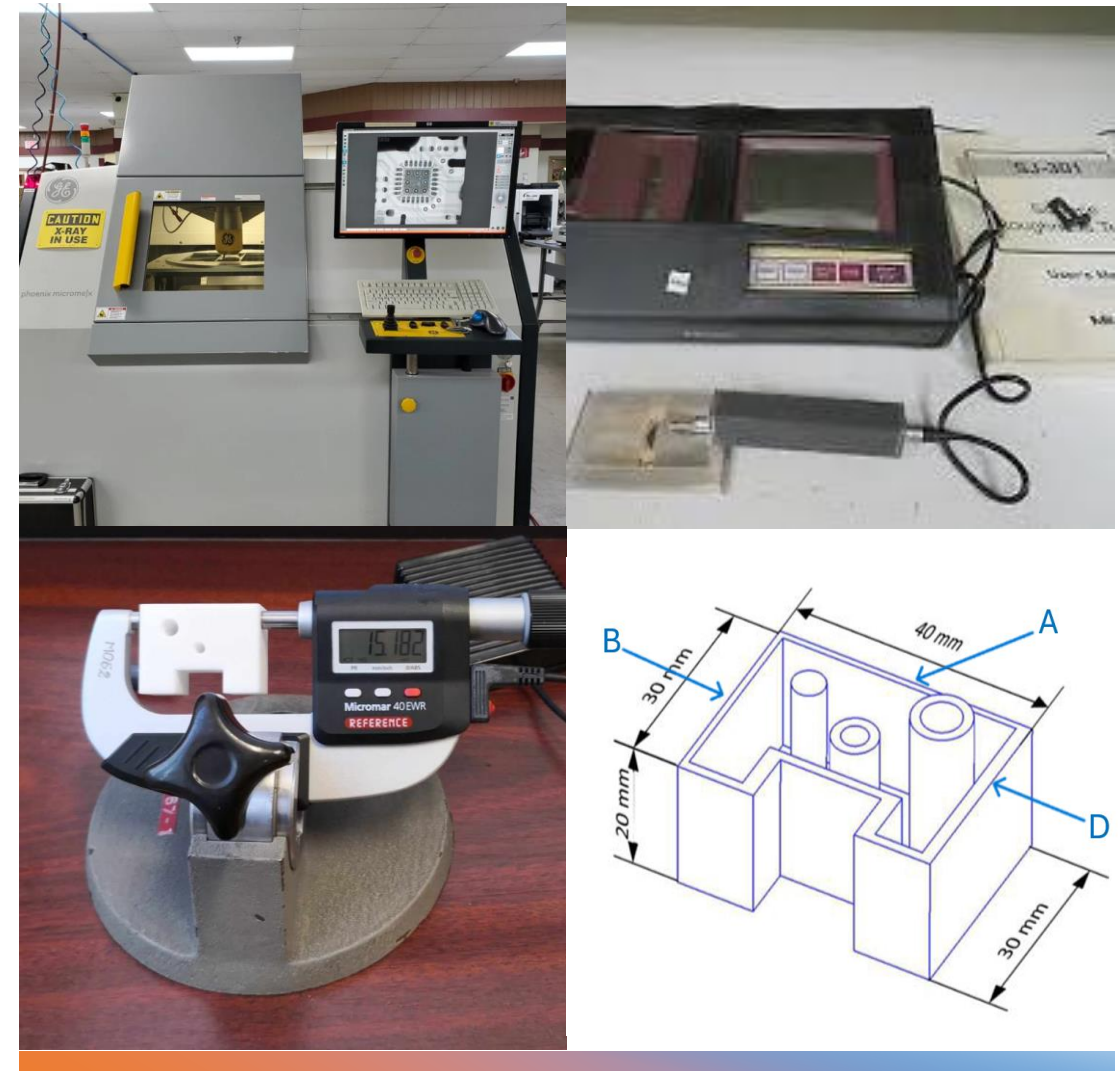
Szakirodalmi áttekintés

- Nincs részletes szakirodalom
- Eltérő módszerek eltérő anyagokkal, módszerekkel, felületi érdesség tartományokkal
- Schmitt & Niggemann (2010): $0,3R_z$ (homokfúvott Al alkatrészek $7 \mu\text{m}$ átlag R_z -vel) -> egyenletes eloszlással figyelembe vett mérési bizonytalanság (JCGM 2008)
- Aloisi & Carmignato (2016): felületi érdességből származó rendszeres hiba javítása csökkenti a mérési bizonytalanságot (AM alkatrészek nagy felületi érdességgel)
- Boeckmans et al. (2015): R_p eltolás CT és CMM között (esztergált felületek)
- Tan (2015): R_p eltolás (esztergált Al felületek)
- Carmignato et al. (2017): $2R_p$ rendszeres eltolás (offset) (periodikus profilok)



Anyagok és módszerek

- **Tárgy:** ProX SLS 6100 3D nyomtatóval nyomtatva, poliamid 12 DuraForm ProX PA porból, 100 μm rétegvastagság, sorozatgyártásban 50 darab, 5 különböző orientációban, SLS (selective laser sintering) technológiával
- **Mérés:** B és D oldal érdeessége, A oldal hossza
- **Érdeesség:** Mitutoyo SJ 301 profilometrikus mérőeszköz, minden munkadarab B és D oldalát 3-szor x irányban, 3-szor y irányban mérve -> 6 adat átlaga
- **CT:** GE Micromex XCT, digitális lapos panel detektor, röntgenső: 110 kV, 80 μA (kimeneti teljesítmény: 8.8 W), fizikai szűrő nélkül, 720 felvételi pozíció, 200 ms időzítés (15 perc szkennelési idő), M=3,141, voxelméret=63.677 μm , rekonstrukció phoenix datos | x 2 szoftverrel
- **Referencia mérés:** Digitális mikrométer 0,001 mm felbontással, minden munkadarab 5 ponton mérve, majd átlagolva (mint ahogy mérőhasábok esetén szokásos)



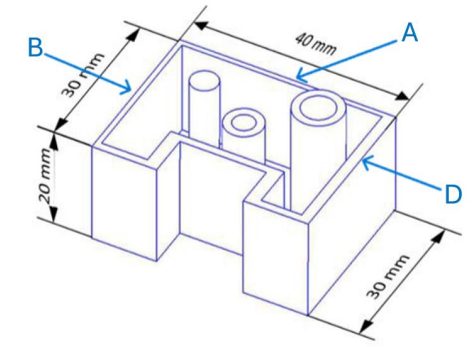
Az adatok struktúrája



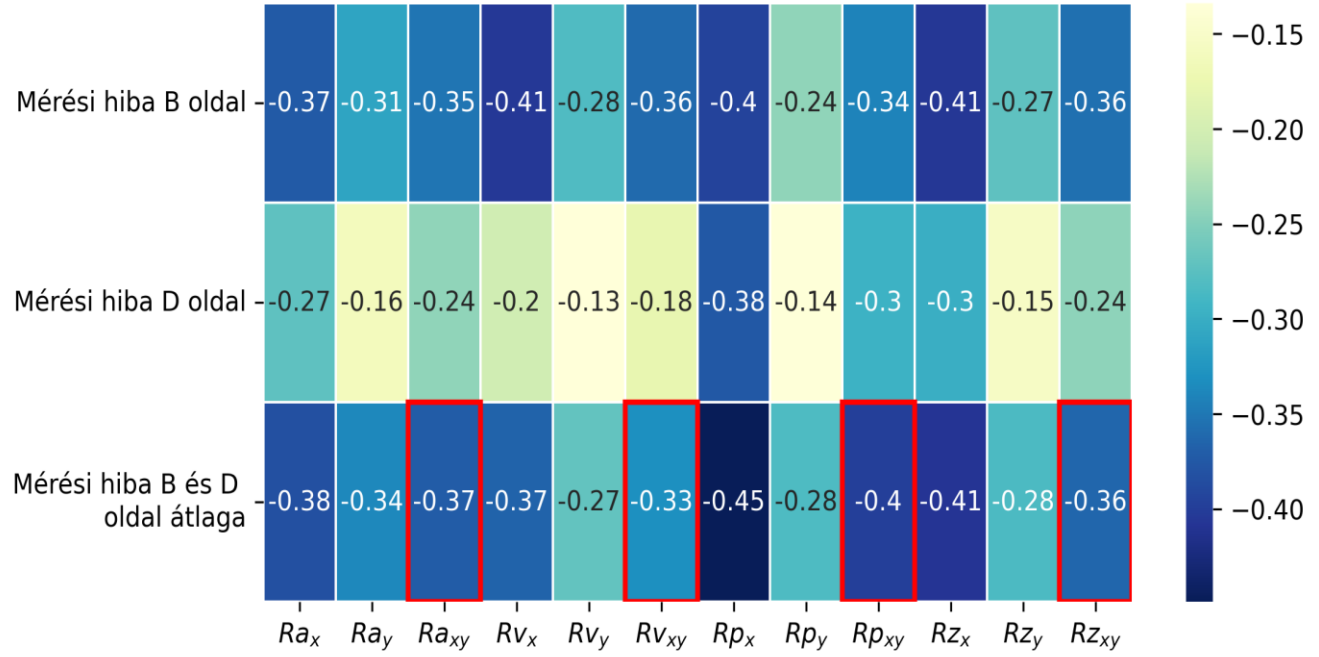
Sorszám	Ref. érték	CT érték	Mérési hiba	D oldal Ra	D oldal Rz	D oldal Rp	D oldal Rv	B oldal Ra	B oldal Rz	B oldal Rp	B oldal Rv	Ra átlag	Rz átlag	Rp átlag	Rv átlag
1	40.0752	40.13	0.0548	17.35	54.85	48.85	104	17.85	60	46.65	106.5	17.6	57.425	47.75	105.25
2	40.0884	40.11	0.0216	16.45	52.7	47.75	100.45	16.35	56.55	45.35	101.9	16.4	54.625	46.55	101.175
3	40.0064	40.08	0.0736	17.65	62.2	47.25	109.5	17.95	61.45	50.25	111.5	17.8	61.825	48.75	110.5
...															

I. féléves eredményeim

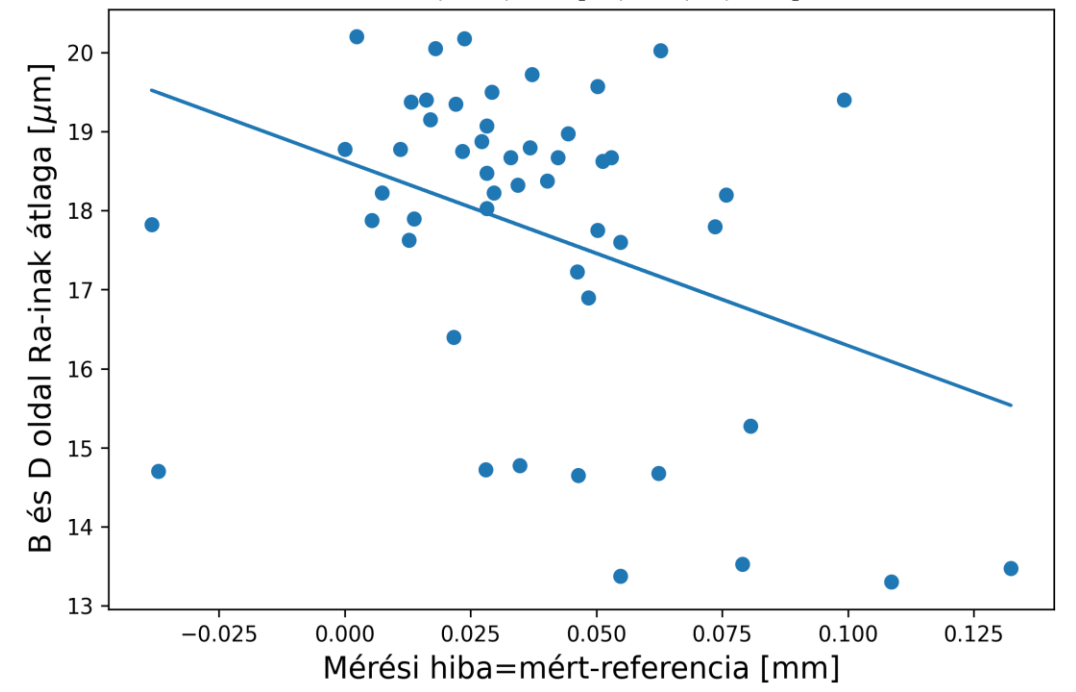
Felületi érdesség és a CT mérési hibája közti korreláció vizsgálata



r korrelációs együtthatók



A B és D oldalra átlagolt Ra függése a mérési hibától, trendvonalal
 $r=-0,372$, $CI=[-0,590;-0,105]$



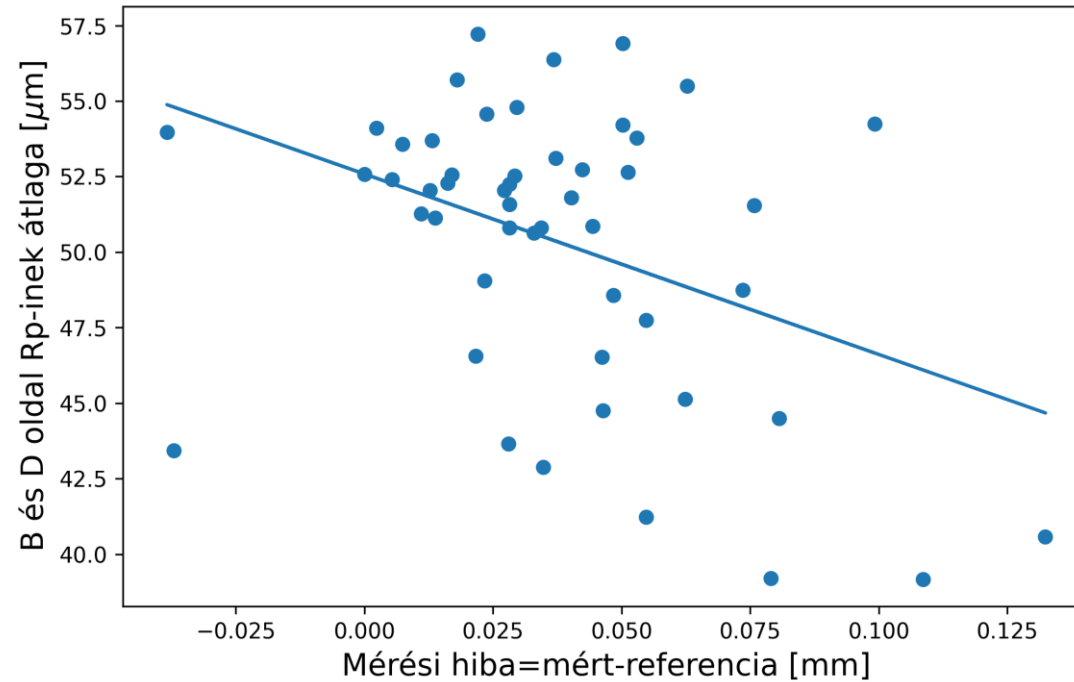
$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n - 1)s_X s_Y}$$

\bar{X}, \bar{Y} X és Y tapasztalati átlagai, s_X, s_Y azok tapasztalati korrigált szórásai

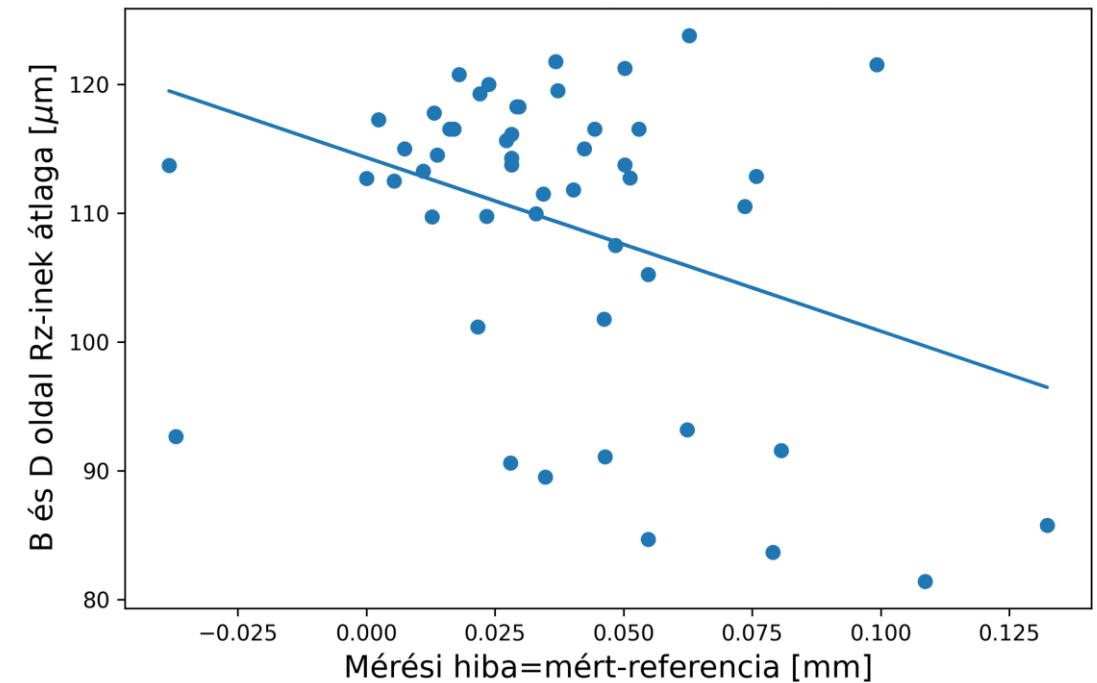
I. féléves eredményeim (folyt.)



A B és D oldalra átlagolt Rp függése a mérési hibától, trendvonalal
 $r=-0.399$, $CI=[-0.610;-0.136]$



A B és D oldalra átlagolt Rz függése a mérési hibától, trendvonalal
 $r=-0.364$, $CI=[-0.584;-0.096]$



I. féléves eredményeim (folyt.)



- A felületi érdesség befolyásolja a CT felületmeghatározását!
 - SLS-nél akár 10-20 mikronos Ra, így nem mindegy, hol húzza meg a felület határát az illesztés, ezzel befolyásolva a hosszmerést
- B és D oldalra vett átlagos Ra-val, Rz-vel, Rp-vel enyhe negatív korreláció
 - Csúcsok és völgyek potenciálisan könnyebb azonosítása -> dimenzionális hibák csökkentése
 - Sima felületek esetén finom kontúrok talán kevésbé azonosíthatóak -> nagyobb felületi érdesség stabilizálhatja a rekonstrukciós folyamatot
- Az irodalomban fellelhető eredményeket nem sikerült igazolni

Az I. félév teljesítménye



- Irodalomkutatás a felületi érdesség, a felületi érdesség hatása az ipari CT-s mérések pontosságára és metrológia témakörében
- Angol nyelvű, nemzetközi konferencián való részvétel: „The effect of surface quality on dimensional measurement with computed tomography”, ISCAME - 10th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering
- Felületi érdesség hatásának vizsgálata a CT mérési pontosságára
 - Felületi érdességi paraméterek kiértékelése
 - Referenciamérések elvégzése
 - t-próba a korrelációra
 - Eredmények ábrázolása, kapcsolat keresése
- Magyar nyelvű cikk: „Felületi érdességi paraméterek vizsgálata esztergált felületek esetében”, Bánki Közlemények 6. évf. 3. szám (2024)
- Teljesített tárgyak:
 - Válogatott fejezetek az anyagvizsgálati módszerekből I.
 - Ipar 4.0 hatása a gyártástechnológiára

Hogyan tovább?



- A felületi érdességmérés mérési bizonytalanság jegyzékét kidolgozni
 - Jegyzék: a mérési bizonytalanság összetevőire, valamint az összetevők kiszámítására vonatkozó számbavétel
- CT többféle felbontásának értelmezése
- További felületi érdességi paraméterek, illetve az S-paraméterek és a CT mérési pontossága közötti összefüggés vizsgálata
- CT vizsgálati folyamatának (rekonstrukció, felületmeghatározás) hatása a hosszmérés pontosságára
- A CT-s mérések verifikálása, kalibrálása?
 - Kalibrálás: etalonnal előállított, mérési bizonytalanságokkal jellemzett mennyiségérték és a mérési bizonytalanságokkal együtt megadott kijelzés közötti összefüggés



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY



ÓBUDAI EGYETEM
BÁNKI DONÁT GÉPÉSZ ÉS
BIZTONSÁGTECHNIKAI MÉRNÖKI KAR

Köszönöm a figyelmet!