

A 3D-SZKENNELÉSI MUNKAFOLYAMAT ROBUSZTUSSÁGÁNAK ÉRTÉKELÉSE HEGESZTETT SZERKEZETEK ESETÉN

EVALUATING THE ROBUSTNESS OF THE 3D SCANNING WORKFLOW FOR WELDED STRUCTURES

Dr. Hegedűs-Kuti János*

ABSZTRAKT

A gyártott termékek hibáinak detektálása a minőségirányítási rendszerek első szintjén történik. A magasabb szinteken azonban a hatékony minőségbiztosítás célja a gyártási nemmegfelelések megelőzése. Munkánkban strukturáltfény szkennelvel vizsgált alkatrészek jellemzőit határozzuk meg, vagyis azt, hogy a kapott eltérések milyen határértékhez köthetők, amely alapján egyértelműen kijelenthető egy alkatrészeletről, hogy megfelel e minőségbiztosítási szempontból. A feladat azon paraméterértékek meghatározása, amelyet autonóm vizsgálórendszerben alapértelmezettként szükséges beállítani. Tudatosan megválasztott pontfelhő illesztési módszereket és azok százalékos küszöbértékeit ajánljuk a módszertani vizsgálat végén.

ABSTRACT

The detection of defects in manufactured products takes place at the first level of quality management systems. At higher levels, however, the goal of effective quality assurance is to prevent manufacturing nonconformities. In our work, we determine the characteristics of components examined with a structured light scanner, i.e., what limit values the deviations obtained can be linked to, on the basis of which it can be clearly stated whether a component complies with quality assurance requirements. The task is to determine the parameter value that needs to be set as the default in an autonomous inspection system. We recommend consciously selected point cloud fitting methods and their percentage threshold values.

1. BEVEZETÉS

Számos kutatás foglalkozik különböző objektumok szkennelésével és a kapcsolódó folyamatokkal. A térbeli felületek vizsgálatához ma már sokféle technológia érhető el [1–2]. Ezekben a területekben a felületvizsgálat jellemzően minőségbiztosítási céllal történik, bár más alkalmazási területeken is megjelentek új fejlesztések [3,4].

A gyártott termékek megfelelősége és minőségi megközelítése a múlt század közepére vált meghatározóvá. Világossá vált, hogy a vevői igények érvényesítése elengedhetetlen a gyártási folyamatokban. Egyre több műszaki fogalom és keretrendszer jelent meg a minőség meghatározására. A 2000-es évek ISO 9000 szabványai már gyakorlati tapasztalatokon alapuló követelményszinteket rögzítettek [5].

A hegesztett szerkezetek minőségi megfelelősége összetett kérdés, mivel magában foglalja az anyag mikrostruktúrájának megfelelő mértékű változását is, amely általában összetett hőfolyamat eredménye [6]. Következésképpen a megfelelőség szabványok és hegesztési dokumentumok alapján értelmezhető. Két kiemelten fontos minőségi szabvány, az ISO 6520 1 [7] és az ISO 5817 [8] határozza meg a hibaképek fogalmait és határértékeit. A vizsgálat következő része ezekre a – vizuálisan észlelhető módon meghatározható – hibaképekre fókuszál.

2. MÓDSZERTAN

A megfelelőség kérdésében a képfeldolgozó rendszerekben használt elfogadási küszöbérték helyes definiálása nem egyértelmű. A vizsgálati körülmények, a képfeldolgozó eljárások, a berendezések és a megvilágítási feltételek mind befolyásolják a pontosságot, ezért szükséges a környezet részletes leírása. A bevezetésben tárgyalt szabványok közül a következők (1. táblázat) kerülnek fókuszba.

A táblázat csak azokat a hegesztési nemmegfeleléseket tartalmazza, amelyek ebben a vizsgálati környezetben elemezhetők, és amelyeket az ISO 5817 szabvány részletez. A határértékek 5 mm-es gyökvastagságú (A5) sarokvarratra és 5 mm-es lemezvastagságra lettek kiszámítva. Az értékek a szabvány szerinti megközelítés alapján három minőségi osztályba (B, C, D) vannak sorolva.

A vizsgálati módszer az HP 3D Structured Light Scanner 5 Pro Edition (max. 0,05 mm pontosság) használatán alapul. A 3D szkennelés nagy, de nem egységes méretű pontfelhőket eredményez, ezért

* adjunktus, ELTE-IK-SMI, hj@inf.elte.hu

szükséges a pontok számának egységesítése mintavételezéssel. A pontfelhők illesztése két lépésben történik:

- durva illesztés (FGR)
- finom illesztés (ICP)

A számításokat Python 3.7.7 környezetben végeztük. A cél egy olyan optimális százalékos érték megtalálása, amely mellett a geometriai hibák jól elkülöníthetők, ugyanakkor nem keletkeznek téves hibacsoportok. Az alábbiakban a Python kód egy részlete látható. (1. ábra)

1. táblázat Hegesztési hibák

Hibák	Hibák sorszama	Határértékek [mm]		
		B	C	D
Repedés	100	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett
Túlzott domborúság	503	3	4	5
Elégtelen gyökvastagság	5213	nem megengedett	1	2
Túlzott gyökvastagság	5214	3	4	5
Krátervég	2025	nem megengedett	1	2
Szakaszos bemaródás	5012	0,5	0,5	1
Túlzott aszimmetria	512	2,25	2,75	3

```
In [*]: %%time
# 6. step: colormap visualization
my_cmap = mpl.colors.LinearSegmentedColormap.from_list("", ["green", "yellow", "red"])
import numpy as np
COL = MplColorHelper('autumn_r', min(dists), np.percentile(dists, 96))
cols = []
for d in dists:
    cols.append(COL.get_rgb(d))
np_colors = np.array(cols)
object_cloud.colors = o3d.utility.Vector3dVector(np_colors[:, :3])
o3d.visualization.draw_geometries([object_cloud])
```

1. ábra Kapcsolódó Python kód

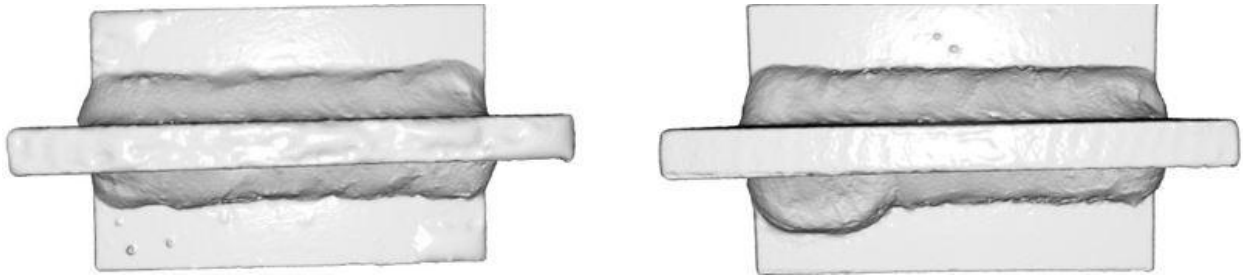
A szkennelési és feldolgozási folyamat lépéseinek vizsgálat alapelve, hogy az eredeti (referencia) pontfelhőt hozzáadjuk a vizsgálandó pontfelhőhöz, majd a különbségeket elemezzük. A vizsgálat célja a pontfelhők összeillesztése után kapott eltérések közötti korrelációk feltárása.

A pontos illesztés érdekében elengedhetetlen a 3D szkennер gondos beállítása:

- megfelelő távolság (példában: 100 cm)
- 10–15° os dőlésszög beállítása
- vetítő és kamera élességének optimalizálása

A pontfelhők mintavételezés után egységesen 250 000 pontot tartalmaznak.

Az FGR segíti a későbbi ICP illesztést azáltal, hogy jellegzetes formákat, éleket és felületeket keres. Az ICP önmagában nem képes a stabil illesztésre, szüksége van erre az előzetes párosításra. Az algoritmus hasonló alakzatokat, éleket és felületeket keres, amelyek párosítása megkönnyíti a finom illesztést. A finomító algoritmus, az Iterative Closest Point (ICP), önmagában nem képes a megfelelő illesztés megoldására, ezért előzetes illesztésre van szüksége. A következő (2. ábra) a referencia és a hibásan illesztett darab pontfelhőjét mutatja.



2. ábra Hibátlan és hibával rendelkező pontfelhő

A pontfelhők illesztési folyamatát követően kiválasztottuk az optimális illesztési küszöbértéket, amelyet a diszkusszió fejezet ismertet

3. EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

A szenzitivitásvizsgálat célja meghatározni, hogy a modell mely részei (pl. struktúra, paraméterek) befolyásolják leginkább a kimenetet. A vizsgálatban a pontfelhők illesztése után kapott távolsáértékek volumenei a döntő tényezők.

A teszt 91–99% küszöbérték tartományban történt. Megállapítható, hogy 97% körül adódik az optimális érték, a hegesztési hibacsoportok többsége esetén.

A hét vizsgált hibacsoport négy fő kategóriába sorolható:

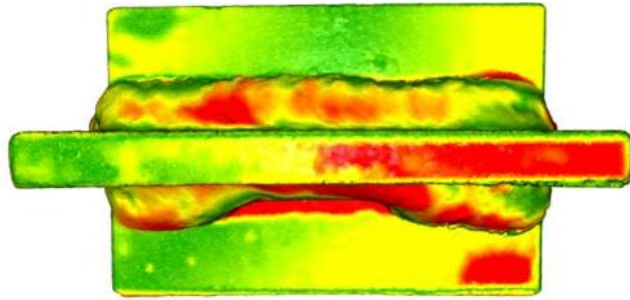
3.1. Repedés

A legkevésbé érzékeny csoport, mivel a hibacsoport mérete kicsi (100 pont / 250 000 pont). A kis, töredezett klaszterek nem érzékelhetők megbízhatóan.

3.2. Váltakozó bemaródás, krátercső, elégtelen beolvadás

Itt a referenciafelhőhöz képest negatív normálvektor irányú eltérések jelennek meg.

A hibaklaszter mérete folyamatosan csökken, 97%-nál ~5700 pont körüli. 98% fölött feleződik, de 99%-nál is észlelhető (3. ábra).



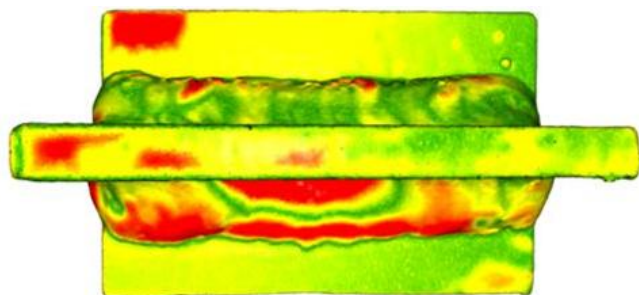
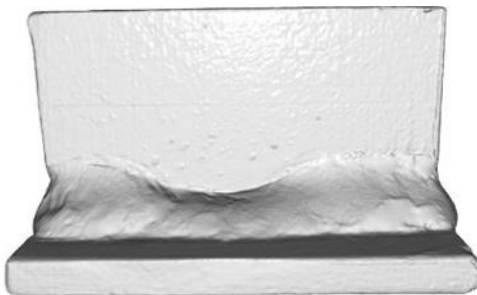
3. ábra RGB analízis, távolságok indikálása

3.3. Túlzott aszimmetria

A legérzékenyebb hibacsoport.

- 90%-nál egy klaszter

- 96%-nál két klaszter
- optimális 97%-nál öt klaszter (összes hiba detektálva), ez fölött már újból csak egy klaszter érzékelhető (4. ábra)

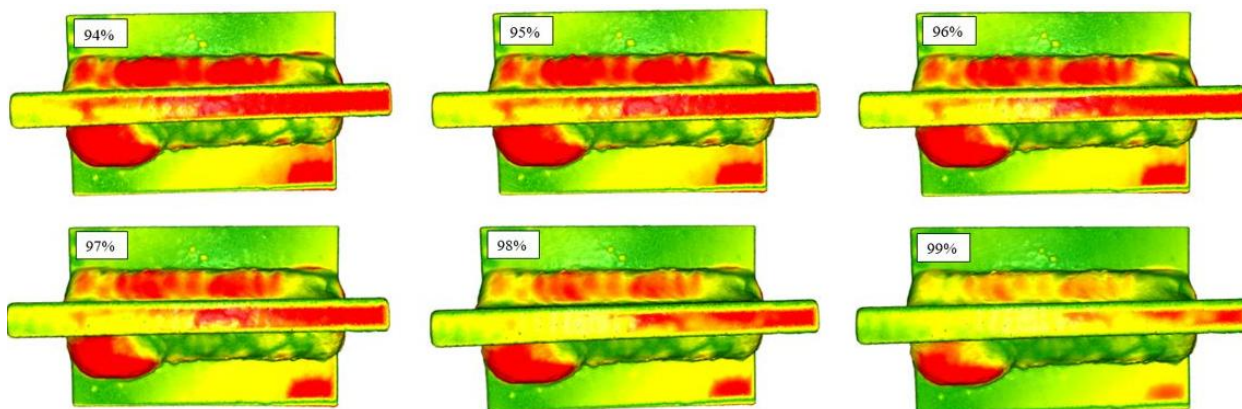


4. ábra RGB analízis 97 százaléknál

3.4. Túlzott gyökvastagság és túlzott domborúság

A két hibacsoport pontszáma hasonló, de geometriájuk eltér.

- 94% tól a gyártási hibák erősen érzékelhetők
- 95–96% között a megengedett geometriai eltérések már nem kritikusak
- 97% fölött a keretrendszer nem szűri megfelelően a hibás darabokat (5. ábra)



5. ábra Távolságok indikálása 97 százalékos illesztés felett

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a 3D szkennelésen alapuló pontfelhő illesztési módszer különböző típusú hegesztési hibákkal szemben eltérő érzékenységgel működik. Ennek megértése kulcsfontosságú a technológia helyes alkalmazásához és a minőségbiztosítási rendszerbe való integrálásához.

A repedések méretük és jellegük miatt a pontfelhő illesztési folyamatban nagyon kis klaszterek formájában jelennek meg. Ez gyakorlatban azt jelenti, hogy a repedéshez tartozó eltérések kevés pontot érintenek, ezek a pontok gyakran szétszórtnak, nem tömör klaszterként jelennek meg, így a rendszer nem képes stabilan és megbízhatóan azonosítani őket.

Ezért a repedésdetektálás esetében a 3D szkennelési módszer nem helyettesítheti a hagyományos vizsgálatokat (pl. mágneses repedésvizsgálat, ultrahang, penetrációs vizsgálat). Elsősorban kiegészítő eszközként használható.

A szabályosabb geometriájú hibák – például szilárd zárványok vagy össze nem olvadások – esetén a pontfelhőben létrejövő eltérés körülhatároltabban és jól strukturált klaszterként jelenik meg. A vizsgálatok azt mutatják, hogy a hibaklaszter mérete lineárisan csökken, ahogy a küszöbérték (százalékos tolerancia) nő, a hiba azonban végig detektálható marad. Az ilyen hibákra a rendszer kiválóan alkalmazható a gyártásközi minőségellenőrzésben. Ez a stabil viselkedés lehetővé teszi, hogy a minőségellenőrzési folyamat konzisztens és automatizálható legyen, még változó gyártási környezetben is.

A szabálytalan alakú hibák esetén a pontfelhő illesztés lényegesen több információt tár fel. Ennek oka, hogy ezek a hibák nagyobb felületet vagy kiterjedést érintenek,

összetett geometriát mutatnak, emiatt a pontfelhő illesztés során több dimenzióban jelennek meg eltérésként.

A vizsgálat szerint 97% toleranciaértéknél detektálható a legtöbb ilyen hiba, akkor láthatóak legpontosabban a hibaklaszterek, és ekkor különülnek el legjobban a geometriai hiba és a gyártási tűrések hatásai. Így ez az érték tekinthető optimális küszöbnek a rendszer beállításához.

A rendszer nem minősít „hibamentesnek” egyetlen munkadarabot sem tévesen

A százalékos küszöbérték növelésével sem fordult elő olyan eset, hogy a rendszer a hibás munkadarabot hibamentesnek jelölje volna, vagy bármilyen hiba jelenlétére ne adott volna ki klasztert. Ez azt jelenti, hogy a rendszer nem hajlamos fals „OK” minősítésre, ami minőségbiztosítási szempontból kritikus előny.

A teszt eredményei alapján meghatározott küszöbérték (kb. 97%) stabil alapot biztosít, automatizált minőségellenőrző rendszerekhez, a gyártási folyamat standardizálásához, hegesztési hibák gyors és objektív detektálásához, visszacsatolt folyamatirányításhoz.

A módszer erőssége, hogy a küszöbérték nem termékspecifikus, hiszen a valós munkadarabról készült szkennelési módszerrel, más alkatészekről is pontfelhő készíthető, így a módszer teljes mértékben geometriafüggetlen lehet, azaz, bármilyen forma vagy szerkezet esetén alkalmazható, prototípusokra és sorozatgyártott elemekre egyaránt, hegesztett, öntött, mart, vagy hajlított alkatrészek esetén is működik.

Ez nagy rugalmasságot ad az üzemek számára, mivel nem szükséges minden termékhez egyedi vizsgálati paramétert beállítani.

6. IRODALOM

- [1] W. Ameen, A. Al-Ahmari, and S. Hammad Mian, Evaluation of handheld scanners for automotive applications, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, p. 217, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8020217>
- [2] Hegedűs-Kuti, J.; Szőlősi, J.; Varga, D.; Abonyi, J.; Andó, M.; Ruppert, T. 3D Scanner-Based Identification of Welding Defects—Clustering the Results of Point Cloud Alignment. *Sensors* 2023, 23, 2503. <https://doi.org/10.3390/s23052503>
- [3] Bräuer-Burchardt, Christian and Munkelt, Christoph and Bleier, Michael and Heinze, Matthias and Gebhart, Ingo and Kühmstedt, Peter and Notni, Gunther, Underwater 3D Scanning System for Cultural Heritage Documentation, *Remote Sensing*, <https://doi.org/10.3390/rs15071864>
- [4] C. Bender, K. Denker, M. Friedrich, K. Hirt, and G. Umlauf, A hand-held laser scanner based on multi-camera stereo-matching, in *Visualization of Large and Unstructured Data Sets: Applications in Geospatial Planning, Modeling and Engineering-Proceedings of IRTG1131 Workshop 2011*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2012. <https://doi.org/10.4230/OASlcs.VLUDS.2011.123>
- [5] Vetchagool, Witchulada and Augustyn, Marcjanna and Mike, Tayles, ISO 9000, activity based costing and organizational performance, *Total Quality Management and Business Excellence*, 2018, <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1549938>
- [6] Draugelates, Ulrich and Schram, Antonia, *Metallographische Verfahren für die Güteprüfung von Schweißverbindungen / Metallographic Methods for Testing the Quality of Weld Joints, Practical Metallography*, 1987, <https://doi.org/10.1515/pm-1987-240802>
- [7] ISO 6520-1:2007, *Welding and Allied Processes—Classification of Geometric Imperfections in Metallic Materials—Part 1: Fusion welding*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.
- [8] ISO 5817:2014, *Welding—Fusion-Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and Their Alloys (Beam Welding Excluded)—Quality Levels for Imperfections*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.