



PANNON EGYETEM

VEGYÉSZMÉRNÖKI- ÉS ANYAGTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

IPARI RENDSZEREK KORSZERŰ IT ALAPÚ INTEGRÁCIÓJA

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE:

HEGEDŰS-KUTI JÁNOS

okleveles gépészmérnök

DOI:10.18136/PE.2025.966

TÉMAVEZETŐK:

DR. CSOBÁN ATTILA

egyetemi adjunktus

DR. ANDÓ MÁTYÁS

egyetemi docens

Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő

Központ Gépészmérnöki Intézeti Tanszék

2025

KIVONAT

Ipari rendszerek korszerű IT alapú integrációja

Kutatásom egy keretrendszert mutat be a hegesztési hibák észlelésére és azonosítására fejlett 3D szkennelési és képfeldolgozási technikák segítségével. A kutatásom első része a 3D szkennelési adatok felhasználására összpontosít a hegesztési hibák azonosítására a pontfelhők sűrűség alapú klaszterezésével. A javasolt módszer hatékonyan észleli és osztályozza az eltéréseket szabványos hegesztési hibaosztályok szerint, bizonyítva, hogy az ISO 5817:2014 szabványban meghatározott hat hegesztési eltérésből ötöt azonosítani lehet. A kutatásom második része a hegesztési varratok detektálását a Machine Learning technológia felé terjeszti ki. A strukturált fény szkennelési és érzékelési algoritmusokból származó adatok integrálásával a részfeladat célja a hegesztési varratok minőség-ellenőrzésének és felügyeletének javítása, hozzájárulva a gyártási folyamatok hatékonyságához. A kombinált megközelítés gépi tanulási algoritmusokat használ a valós idejű elemzéshez és optimalizáláshoz, megkönnyítve a hegesztési varratok szélességének pontos meghatározását és a hibák azonosítását. Az eredmények rávilágítanak a digitális ikertechnológiában rejlő potenciálra a valós idejű visszacsatolás és a hegesztési paraméterek optimalizálása terén, ami végső soron javítja a gyártási hatékonyságot és a termékminőséget.

ABSTRACT

IT-based integration of Industrial systems

My research presents a framework for detecting and identifying weld defects using advanced 3D scanning and image processing techniques. The first part of my research focuses on using 3D scanner data to identify weld defects by density-based clustering of point clouds. The proposed method efficiently detects and classifies deviations according to standard weld defect classes, demonstrating that five out of six weld deviations defined in ISO 5817:2014 can be identified. The second part of my research extends weld seam detection to Machine Learning technology. By integrating data from structured light scanner and edge detection algorithms, this subproject aims to improve quality control and monitoring of weld seams, contributing to the efficiency of manufacturing processes. The combined approach uses machine learning algorithms for real-time analysis and optimisation, facilitating accurate weld width determination and defect identification. The results highlight the potential of digital twin technology for real-time feedback and optimisation of welding parameters, ultimately improving manufacturing efficiency and product quality.

ZUSAMMENFASSUNG

IT-basierte Integration Industrieller Systeme

Meine Forschungsarbeit stellt einen Rahmen für die Erkennung und Identifizierung von Schweißnahtdefekten mit Hilfe fortschrittlicher 3D-Scan- und Bildverarbeitungstechniken vor. Der erste Teil meiner Forschung konzentriert sich auf die Verwendung von 3D-Scannerdaten zur Identifizierung von Schweißnahtdefekten durch dichtebasiertes Clustering von Punktwolken. Die vorgeschlagene Methode erkennt und klassifiziert Abweichungen effizient nach Standard-Schweißfehler-Klassen und zeigt, dass fünf von sechs in der ISO 5817:2014 definierten Schweißnahtabweichungen identifiziert werden können. Der zweite Teil meiner Forschung erweitert die Schweißnahterkennung um die Technologie des maschinellen Lernens. Durch die Integration von Daten aus strukturierten Licht-Scannern und Algorithmen zur Kantenerkennung zielt dieses Teilprojekt darauf ab, die Qualitätskontrolle und Überwachung von Schweißnähten zu verbessern und so zur Effizienz von Fertigungsprozessen beizutragen. Der kombinierte Ansatz nutzt Algorithmen des maschinellen Lernens für die Analyse und Optimierung in Echtzeit, was eine genaue Bestimmung der Schweißnahtbreite und die Identifizierung von Defekten ermöglicht. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial der Technologie des digitalen Zwillings für Echtzeit-Feedback und die Optimierung von Schweißparametern, was letztlich zu einer Verbesserung der Fertigungseffizienz und der Produktqualität führt.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1 Kutatási motiváció és háttér.....	1
1.2 Kutatás jelentősége.....	8
1.3 A disszertáció felépítése	10
2. Irodalmi összefoglaló.....	12
2.1 Korábbi kutatások összegzése	12
2.2 Hegesztési varratok vizsgálata.....	25
2.2.1. Roncsolásos anyagvizsgálati módszerek	28
2.2.2 Roncsolásmentes (nem destruktív) anyagvizsgálatok	29
2.3 A kutatáshoz kapcsolódó elméleti háttér	35
2.3.1 3D szkennelési technológiák	37
2.3.2 Strukturált fény módszer.....	44
2.3.3 Pontfelhők egymásra illesztése minőségellenőrzésként	47
2.3.4 Szimulációs környezet használata eredményorientáltan.....	51
3. Kutatási módszertan	55
3.1 Kutatási terv.....	55
3.2 Adatgyűjtés és elemzés 3D pontfelhők illesztése esetén.....	56
3.2.1 Pontfelhők mint benetek	57
3.2.2 Pontfelhők egymásra illesztése	60
3.2.3 Sűrűség-alapú klaszterezés.....	62
3.2.4 Szabványhoz igazítás	64
3.3 Adatok integrálása hegesztő robot munkafolyamata közben	65
3.3.1 Virtuális iker alkalmazása	66
3.3.2 Kísérleti tervezés	69
3.3.3 Adatgyűjtés az illesztés és képfeldolgozás folyamataiból	71

3.4 Additív gyártás, utólagos hőkezeléssel.....	75
4. Tudományos eredmények bemutatása	76
4.1 Eredmények bemutatása CAD modellek illesztése esetén	76
4.1.1 Repedés	76
4.1.2 Túlzott konvexitás	78
4.1.3 Tökéletlen forma esetén	79
4.1.4 Végkráter.....	81
4.1.5 Szakaszos alámetszés.....	82
4.1.6 A túlzott aszimmetria	83
4.2 Eredmények a sarokvarratok pontfelhői esetén	85
4.3 Eredmények bemutatása és elemzése hegesztési kísérletből.....	87
4.3.1 Állandó hegesztési sebesség mellett, növekvő villamos paraméterek.....	88
4.3.2 Állandó villamos paraméterek mellett, változó hegesztési sebesség.....	90
4.3.3 Szélesség meghatározása varrat kontúrjainak átlagolásával vagy becsléssel	93
5. Diskusszió	96
6. Következtetések.....	99
6.1 A kutatásom megállapításai pontfelhőillesztéses vizsgálatokkal kapcsolatosan	99
6.2 Adatfúzióval kapcsolatos megállapítások.....	99
6.3 Kutatás főbb megállapításai az utólagos hőkezelésekkel kapcsolatosan.....	100
7. Tézispontok.....	101
8. Publikációs lista, egyéb tudományos aktivitások	105
Köszönetnyilvánítás	121

JELÖLÉSJEGYZÉK

ERP	Enterprise Resource Planning (Vállalati erőforrás tervezés)
MES	Manufacturing Execution System (Gyártást előkészítő/támogató rendszer)
FNN	Előrecsatolt neurális hálózatok
CNN	Convolutional neural network (Konvolúciós neurális hálózatok)
AI	Mesterséges intelligencia
IEC	Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság
DT	Digital twin (Digitális iker)
CPS	Cyber-Physical Systems (Kiber-fizikai rendszerek)
BD	Big Data
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
CC	Felhőalapú számítástechnika
CS	Kiberbiztonság
IIoT	Industrial - Internet of Things (Ipari IoT)
ML	Machine Learning (Gépi tanulás)
FDM	Fused deposition modeling (fuzionált lerakódás modellezés)
ME	Material extrusion (anyagextrudálás)
$\mathbf{p}_s; \mathbf{p}_i$	Jellemző pontleírókkal rendelkező pontpárok (FPFH)
$\mathbf{p}_s; \mathbf{q}_s$	Lekérdezési pontpár (FPFH)
\mathbf{t}	Elforgatási vektor (ICP)
$\mathbf{p}'_j; \mathbf{q}'_i$	Tömegközéppontjuk szerint való kivonandók P and Q felhőkből (ICP)
$\bar{\mathbf{p}}$	Mozdított és elforgatott pontok (ICP)
\mathbf{n}_t	\mathbf{p}_t -hez kapcsolódó normálvektor (FPFH)

\mathbf{n}_s	\mathbf{p}_s -hez kapcsolódó normálvektor (FPFH)
T	Transzformációs mátrix (ICP)
$E(\mathbf{R}, \mathbf{t})$	Függvény \mathbf{R} forgatási mátrixal, és \mathbf{t} transzformációs vektorral (ICP)
$NN_Q(\bar{\mathbf{p}})$	$\bar{\mathbf{p}}$ legközelebbi szomszéd pontjai Q felhőből (DBSCAN)
$NN_Q^{10}(\bar{\mathbf{p}})$	Felső 10 százaléka $NN_Q(\bar{\mathbf{p}})$ -nak (DBSCAN)
$\mathbf{P}; \mathbf{Q}$	Etalon és teszt pontfelhők mintavétel után (CAD)
\mathbf{W}	Keresztkovariancia mátrix (ICP)
\mathbf{C}	Vizsgálat alatt álló készlet (ICP)
$\mu_P; \mu_Q$	Vizsgálat alatt lévő felhő tömegközéppontjai (ICP)
α, β, γ	Különböző szög jellemzők (FPFH)
$\mathbf{u}; \mathbf{v}; \mathbf{n}$	Rögzített koordináta keretrendszer (FPFH)
ω_i	Távolság a \mathbf{p}_s lekérdezési pont és a szomszédja \mathbf{p}_i között (FPFH)
$\mathcal{N}_{p_s} \mathbf{p}_s$	lekérdezési pont környéke (FPFH)
ϵ	Az algoritmus ϵ sugárral ellenőrzi minden pontnál, hogy vannak-e szomszédai a minpoints paraméternek megfelelően (DBSCAN)
$minpoints$	A klaszterenkénti pontok minimális száma (DBSCAN)
pcr	egy-egy pontjai és szomszédai közötti távolság számtani átlaga (DBSCAN)
$RMSE$	Gyök-átlag-négyzet hiba (DBSCAN)
N	A pontok száma a mintavétel után

1. Bevezetés

1.1 Kutatási motiváció és háttér

Az elmúlt néhány év globális recessziója megváltoztatta az ipari szektor nézőpontját, és ezért még jobban a létrehozott valódi értékekre összpontosít. Azok a cégek, amelyek korábban alacsony munkaerőköltségű területekre helyezték át tevékenységüket, most versenyképességük visszaszerzésére törekednek. A német gyártási stratégia kulcsfontosságú ebben a váltásban, amely kezdeményezéseket indított el az ipari szektorban betöltött vezető szerepének megőrzésére. Megjelent az "Ipar 4.0" kifejezés, amely jelentős ígéreteket hozott magával a gyártási rendszerek legújabb kihívásainak kezelésére. Az Ipar 4.0 (I4.0) valódi termelési értékek központba helyezését erősíti a kapcsolódó technológiáival. Átalakítja az életmódot, új üzleti modelleket hoz létre, és forradalmasítja a gyártást a digitális átalakulás korszakában [1].

Egyre nagyobb figyelmet kap a gyártási rendszerek átalakulásában az informatikai eszközök megjelenése, amely a gyártástechnológia területén is kulcsfontosságúvá vált. Az ipari automatizálás és a modern gépgyártás fejlődése jelentős hatással van a gyártási folyamatokra. Motivációm azon alapszik, hogy az informatikai alkalmazások érzékelési és kommunikációs képességei egyre inkább lehetővé teszik az adatok valós idejű gyűjtését és elemzését, ami lerövidíti az információáramlást és növeli a hatékonyságot. Az ipari automatizálás révén a gépek nemcsak gyorsabban és hatékonyabban működnek, de az emberi hibákból adódó problémákat is jelentősen minimalizálni lehet. Az intelligens gépek olyan adatokat is gyűjtenek, amelyek segítik a gyártási folyamat optimalizálását, így a jövő egyre inkább az adat-vezérelt megoldásokra épít.

Gyártási rendszerek, Ipar 4.0

Az adatok elemzése révén a gyártási rendszerek azonosíthatják a szűk keresztmetszeteket és a hatékonysági hiányosságokat, majd ennek megfelelően módosíthatják a folyamatokat. Ezáltal a gyártási rendszerek folyamatosan javulnak és egyre hatékonyabbá válnak.

Az IoT-eszközök (Internet of Things) által gyűjtött adatok szintén segítenek a gyártási folyamatok optimalizálásában.

Az IoT-eszközök lehetővé teszik az adatok valós idejű gyűjtését és elemzését, melyek számos előnyt biztosít a gyártási folyamatok számára [1]. A műszaki alrendszerekbe való csoportosítása nem kerülhető meg a gyártási rendszerek hatékonyságának növelésénél sem.

Az ilyen irányú csoportosítás szükségessé teszi az adatok integrálását és központi kezelését is. Ezáltal az adatok könnyen hozzáférhetők és elemezhetők, ami megkönnyíti a döntéshozatalt. Az adatok alapján a gyártási rendszerek felügyeletét végző szoftverek pontosabb előrejelzéseket készíthetnek és jobban felkészülhetnek a kihívásokra.

A valós idejű adatgyűjtés és elemzés lehetővé teszi a gyártási rendszerek számára, hogy gyorsan reagáljanak a változásokra és problémákra. Például, ha egy gép meghibásodik vagy egy alkatrész nem felel meg a minőségi követelményeknek, az IoT-eszközök azonnal értesítést küldenek a megfelelő személyeknek, akik gyorsan beavatkozhatnak és megoldhatják a problémát. Ez csökkenti a leállások számát és növeli a termelés hatékonyságát.

A technológiai szint növekedése viszont számos problémát is okozhat az ipari ágazatokban. Az egyik legfontosabb kihívás az, hogy az új technológiák bevezetése és integrálása gyakran jelentős költségekkel és időráfordítással jár. Továbbá a bevezetés során gyakran előfordulhatnak kompatibilitási problémák a meglévő rendszerekkel, ami további fejlesztéseket és módosításokat igényelnek. Ezen kívül megnehezítheti a régi módszerekkel végzett karbantartást és a hibakeresést is. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az új technológiák alkalmazása gyakran új készségeket és ismereteket igényel a munkavállalóktól, ami további képzési igényeket generálnak.

Fontos, hogy az információáramlás alulról felfelé történik, ami azt jelenti, hogy az alsóbb szinteken gyűjtött adatokat a felsőbb szintek használják fel a döntéshozatalhoz. Ez a folyamat lehetővé teszi a gyártási rendszerek számára, hogy gyorsan reagáljanak a változásokra és problémákra, és szükség esetén beavatkozzanak az aktuálisan haladó műveletekbe.

A jövő egyik legnagyobb kihívása az, hogy ezeket a rendszereket autonóm szinten értékeljük és működtessük.

Az ERP (Enterprise Resource Planning) és MES (Manufacturing Execution System) rendszerek közötti kommunikáció alapvető fontosságú a modulok egymás közötti támogatásában [2].

Az ERP rendszer egy olyan vállalati információs rendszer, amelyet a vállalat üzleti folyamatainak és tranzakcióinak integrálására és optimalizálására terveztek [2].

A MES-alkalmazások megpróbálják hozzáadni a döntéshozatali eszközökhöz szükséges képességeket, ahol adaptív végrehajtási stratégiákra van szükség az ellátási lánc feltöltéséhez, miközben dinamikusan reagálnak az előre nem látható változásokra [3].

A komplex rendszertervezés során el kell mozdulni az elszigetelt gépcsoportok működési szintjétől az autonóm döntéshozatalra képes rendszerek felé [4]. Az autonómia eléréséhez több komponens egyidejű fejlesztése szükséges, beleértve a dokumentumkezelő modulokat is, amelyek lehetnek webes alkalmazások vagy adatbázis-kezelő rendszerek. Ez a megközelítés lehetővé teszi a rendszerek számára, hogy önállóan működjenek és döntéseket hozzanak, ami növeli a hatékonyságot és csökkenti az emberi beavatkozás szükségességét.

Az informatikai architektúra és a különböző alkalmazások, mint például a neurális hálózatok is kulcsfontosságúak lehetnek a műszaki paraméterek helyes megválasztásában és az autonóm termelési rendszerek létrehozásában. A gépi tanulás alapú hálózatok képesek nagy mennyiségű adatot elemezni és mintázatukat felismerni, ami számos előnyt biztosít a gyártási folyamatok számára.

A neurális hálózatok fejlődése a korai elméleti modellekben gyökerezik, mint például a McCulloch-Pitts neuronmodell, amely a biológiai neuronok egyszerűsített ábrázolása volt. Az ilyen modellek megmutatták, hogy a neurális hálózatok elméletileg bármilyen kiszámítható függvényt ki tudnak számítani [5].

A mesterséges intelligencia (AI) alkalmazása a hegesztéstechnológia területén számos új lehetőséget nyit meg, és jelentős előnyöket kínál a gyártási folyamatok optimalizálásában. Az AI-alapú rendszerek képesek optimalizálni például a hegesztési füst elszívását, figyelembe véve a külső hatásokat és a szükséges elszívási teljesítményt. Ezek a rendszerek intelligens vezérléssel rendelkeznek, és képesek önállóan kommunikálni más gépekkel

Hegesztéstechnológia, minőségbiztosítás

A kapcsolódó szabványrendszerek nem megkerülhetők, mivel egy adat-vezérelt autonóm gyártósor működése szabványok által létrehozott keretekhez kötött, így azok beépítése szükségszerű. Az IEC (Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság) szabványrendszere [6] is az automatizálási piramis szintjei szerint strukturálódik.

Az IEC 62264-1:2013 specifikáció [7] támogatja a szintek közötti összefüggések értelmezését, ami kulcsfontosságú az információáramlás és a döntéshozatali folyamatok szempontjából.

A gyártási rendszereket leszűkítve a hegesztéstechnológia területére érve tapasztalhatjuk, hogy a minőségbiztosítási terület szegmense valóban széles körű és sokrétű.

Ugyanakkor erre a területre fókuszálva a kapcsolódó kutatások eddig kevés figyelmet szenteltek a hegesztési varratok megfeleltetésének kérdésköréhez.

Tehát a szabványok, a folyamatbiztonság és a gazdasági szempontok szintén fontos tényezők a hegesztéstechnológia területén. A vizsgálatok rendje így ezen a területen is szabványosított, ami biztosítja, hogy a hegesztési folyamatok és az ellenőrzések egységesek és megbízhatóak legyenek. A hegesztési minőségirányítás hibakategóriák és kódok segítségével történik, amelyek meghatározzák, hogy milyen típusú hibák elfogadhatók és melyek nem. A hegesztett kötés akkor megfelelő, ha a hibák mértéke a határértékeken belül van; repedések esetén egyik minőségi osztályban sem elfogadhatóak.

A releváns kutatások roncsolásos és roncsolásmentes módszereket egyaránt említenek, ám az érintésmentes vizsgálatok alkalmazása ritka. Mivel egy gyártósori környezetben a hegesztett kötés megfelelőségének ellenőrzése alapvető fontosságú, így a roncsolásos vizsgálatok során alapos vizsgálatok végeznek el. A gyártmányt fizikailag megsemmisítik, belső szerkezetét és hibáit feltárják, következtetéseket vonnak le. Ez időigényes és körülményes, sokszor gyorsabb válaszokra és visszacsatolásokra van szükség, hogy az esetleges gyártósori hibák esetén a károkat minimalizálhassuk. Így kerülnek fókuszba az roncsolásmentes és érintésmentes vizsgálatok, ahol a munkadarab vagy a hegesztési varrat kamerák, szenzorok vagy radarok alá kerül. Ezen folyamatok pedig már lehetővé teszik, hogy az anyagok és kötéseik vizsgálata során azokban ne keletkezzen kár.

A varratfelismerés kutatásának területe képfeldolgozó algoritmusokkal gyártósori környezetben, jelenleg egy kutatási rés. Ezek az algoritmusok más területeken képesek minták alakzatok felismerésére. Ha a hegesztési varratok automatikus detektálására és elemzésére várhatóan hasonlóan viselkednek, az jelentősen növelheti a minőségbiztosításhoz kapcsolódó vizsgálatok hatékonyságát és pontosságát.

Jelen tanulmány motivációs háttere, hogy az új 3D technológiás alkalmazások bevezetésével, az ipari rendszerek korszerű IT-alapú integrációjával segítse előkészítse és támogassa azt a gyártósort, amely elindult a gyártás során keletkező adatok monitorozására és elemzésére. Valamint megkeresse az optimalizálás útját az információk hatékony visszacsatolása során.

Az új technológiák, mint az IoT, a 3D technológiás alkalmazások tehát, illetve az AI (mesterséges intelligencia, alapvetően megváltoztatják a gyártási folyamatokat és az ipar működésének kapcsolatát.

A fenntarthatóság és a környezettudatosság is egyre nagyobb szerepet kap, miközben az emberi munkaerő és az automatizáció közötti egyensúly megteremtése kulcsfontosságú.

A kutatásom célja ehhez kapcsolódóan kezdetben egy olyan módszer kidolgozása, amely támogatja a hegesztések minősítését. Ez azt jelenti, hogy a kutatás egy új, hatékonyabb eljárást kíván létrehozni a hegesztési hibák azonosítására és értékelésére. A módszer jelentősége abban rejlik, hogy adatvezérelt értékelési technikát alkalmazok, amely lehetővé teszi a hegesztések minőségének pontosabb és gyorsabb meghatározását.

Az eljárás során képfeldolgozási és CAD modellező szoftvereket használok, ahol 3D modellezési alkalmazások lehetővé teszi a hegesztési hibák háromdimenziós megjelenítését és elemzését.

A pontfelhő alapú illesztés technikája, a bemenetet képező hegesztési varratokat prezentáló pontfelhők vizsgálataként nem jellemző. Célom, hogy a módszerem képes legyen ezek közül minél többet felismerni, ha a detektálás nem valósulhat meg, annak az okát pedig világossá tenni. Ez a megközelítés nemcsak a hegesztési folyamatok minőségellenőrzését javíthatja, hanem hozzájárul az autonóm gyártási rendszerek fejlesztéséhez is. Az autonóm gyártási rendszerek célja, hogy minimális emberi beavatkozással működjenek, és az algoritmusok által nyújtott pontos hibafelismerés és osztályozás lehetővé teszi a rendszerek számára, hogy valós időben reagáljanak a gyártási folyamat során felmerülő problémákra.

A kutatásom során az ISO 5817:2014 szabványban [8] meghatározott hat fő hegesztési hibához való eltérést kívánok felderíteni. Ezek az eltérések a következők:

1. Repedés
2. Üregek
3. Szilárd zárványok
4. Fúzió és penetráció hiánya
5. Tökéletlen forma
6. Egyéb hibák

Az eredmények azt mutatják, hogy a módszer hatékonyan képes azonosítani és csoportosítani a hegesztési hibákat a különböző pontok helyzete alapján az eltérések klasztereiben. Az azonosított klasztereket ezután a szabványos hegesztési hibakategóriák szerint osztályozzák.

A kutatás jelentősége abban rejlik, hogy bemutat egy olyan adatvezérelt módszert, amely hatékonyan képes azonosítani és csoportosítani a hegesztési hibákat. Ez a módszer lehetővé teszi a hegesztési hibák gyorsabb és pontosabb felismerését, ami hozzájárulhat a hegesztési folyamatok termelékenységének és minőségének javításához, közelítve ezzel az Ipar 4.0 elvárásaihoz.

Valós idejű adatvizualizáció

Kutatásom következő lépéseinek célja, egy olyan keretrendszer kidolgozása, amely valós idejű adatvizualizációt biztosít egy hegesztőrobotok adataihoz és előkészíti a digitális iker rendszer jövőbeni alkalmazását szimulációs folyamatok futtatásához. Megoldást keresve ezzel a hegesztési folyamatok alatt létrejövő adatok gyűjtésének és regisztrálásának problémájára, továbbá lehetőséget teremtve azok későbbi elemzésekre, úgy, mint predikció vagy becslés.

A digitális gyártás megvalósításához szükséges adatvezérelt rendszerek támogatása egy hegesztő robot esetében, egy hozzá csatolt virtuális robot felhasználásával kell, hogy kezdődjön. Ez a virtuális robot egy olyan keretrendszer megalkotását teszi lehetővé, amely egy hattengelyes hegesztő robot által küldött adatok valós idejű vizualizációját valósítja meg. Ez a rendszer alkalmas arra, hogy a hegesztési technológiai rendszerek adatainak rögzítése és elemzése létrejöhessen, ezáltal hozzájárulva az autonóm gyártási folyamatok hatékonyságának növeléséhez.

A rendszer képes azonosítani és elemezni a hegesztési folyamat során felmerülő eltéréseket. Ez a valós idejű adatfeldolgozás lehetővé teszi, hogy a rendszer azonnal reagáljon a felmerülő hibákra, és szükség esetén beavatkozzon a folyamatba a minőség fenntartása érdekében.

A digitális iker egy virtuális másolat, amely valós időben követi a fizikai rendszer viselkedését, és lehetővé teszi a folyamatok optimalizálását és autonóm irányítását. Képes egy digitális virtuális interfész megvalósítására, a varratkészítés során összegyűjtött adatok elemzésével és felhasználásával biztosítva lett az előkészítés egy magasabb szintű hatékonyság eléréséhez.

A tesztrendszer célja, hogy valós időben gyűjtse és vizualizálja a hegesztőrobotok mozgásának és hegesztési paramétereinek adatait, mint például az áramerősség és feszültség és hegesztési sebességhez kapcsolódó információkat.

Autonóm robotok

A gyártási paradigma gyorsan eltolódik a tömeggyártástól a testreszabott gyártás felé, amely újra- konfigurálható automatizálási technológiákat, például robotokat igényel.

Ennek hatása a gyártó vállalatok termelési rendszereire az, hogy ez a tendencia szélesebb termékváltozatok gyártásához vezet, ideális esetben az egyedi téteknagyságra összpontosítva. Manapság a kívánt rugalmasság elérése érdekében a robotok elengedhetetlenek a gyártási rendszerekben. Ehhez szükségesek a számítástechnikai, kommunikációs, irányítási, autonómiai és szociális képességek, amelyeket a mikroprocesszorok és a mesterséges intelligencia (AI) kombinálása biztosít, hogy a termékek, szolgáltatások és gépek okosabbá váljanak. Az adaptív és rugalmas, mesterséges intelligenciával rendelkező robotok megkönnyíthetik a különféle termelést, és ennek következtében csökkenthetik a termelési költségeket.

Az olyan folyamatok, mint a termékfejlesztés, gyártás és összeszerelési fázisok, nagyon hasznosak a gyártási rendszerekben az adaptív robotok számára. Fontos megjegyezni, hogy a teljesen autonóm robotok maguk hozzák meg döntéseiket a végrehajtásról, és folyamatosan változó környezetekben működnek kezelői beavatkozás nélkül, figyelembe véve az ipari és nem ipari környezeteket. A veszélyes ipari alkalmazások strukturálatlan környezetben javíthatók autonóm ipari robottal. Egy többszörösen autonóm robot együttműködési megközelítése, különböző teljesítményű robotokból áll, illetve több autonóm ipari robot dolgozik csapatban, lehetővé téve a gyártási alkalmazások szélesebb körét.

A kutatásom területe kapcsolódik a hegesztési varratok detektálási módjainak a kiterjesztéséhez, válaszokat keresve arra a kérdésre, hogy hogyan lehet hatékonyan felhasználni a hegesztési varratok keletkezése közben létrejött adatokat (mint például a geometriai koordináta értékek és a villamos paraméterek) eredményorientáltan a varratszélesség és varratminőség meghatározása céljából. Nagy segítség, hogy a valós idejű adatgyűjtés és megjelenítés lehetővé teszi a hegesztési folyamat minden aspektusának pontos nyomon követését.

A kutatási cél tehát egy olyan rendszer kifejlesztése, amely képes a hegesztési folyamatok alatt keletkező adatok valós idejű monitorozási lehetőségét és a keretrendszer által rögzített adatokat felhasználni, illetve a képi algoritmusok támogatása által (Canny, Sober, Grid) gyűjtött adatokkal integrálva képes a paraméterek és folyamatok becslésére.

Kutatásom során az integrált keretrendszer kifejlesztése, a hegesztési varratok vizsgálatának lehetőségeit bővíti ki, támogatva ezzel a 3D képalkotási technológiai módszereket, amelyek segítik azonosítani a hegesztési hibákat.

1.2 Kutatás jelentősége

Az I4.0 termelési integrációjának két megközelítése van: vízszintes és vertikális integrációk [9]. A valós idejű adatmegosztást ezt a kétfajta integrációt jelentős mértékben támogatja [10].

Előbbi, a horizontális integráció, amely a vállalatközi integráció [11], alapja egy szoros és magas szintű együttműködésnek több cég között. Információs rendszerek segítségével támogatja a termék életciklusát [10], egy összekapcsolt ökoszisztémát hoz létre ugyanazon az értékteremtő hálózaton belül.

Utóbbi a vertikális integráció, amely egy hálózatba kötött gyártási rendszer [12], egy vállalaton belüli integráció [11] melynek az alapja információcsere és együttműködés a különböző személyek között, továbbá a vállalati hierarchia szintjei, mint például a vállalati tervezés, a termelés ütemezése vagy irányítása között [12]. Vertikális integráció „digitalizálja” az egész folyamatot az egész szervezeten belül, figyelembe véve a gyártási folyamatokból származó összes adatot, pl. a műveletek tervezése valós időben [11].

Hegesztési hibák minőségbiztosításának támogatása

A termékek létrehozásának egyik utolsó lépése a minőségbiztosítás. Hegesztett termékek minőségbiztosítása a korábban már említettek szerint különös figyelmet igényel a kapcsolódó szigorú szabványok miatt. Így olyan érintésmentes vizsgálatok kerülhetnek előtérbe, amelyek magas felügyelet és odafigyelés mellett képesek működni.

Kutatásom jelentősége olyan módszer kidolgozásával indul, amely a 3D szkennertől gyűjtött adatokat felhasználva hatékonyan azonosítja és csoportosítja a hegesztési hibákat.

Magas minőségű pontfelhőket generálok a kiválasztott hegesztett alkatrészekből az illesztésekhez, másrészt pedig felülnézetből készült fényképeket vizsgálok meg képfelismerő algoritmusokkal a varratszélesség meghatározásának céljából. Előbbiek esetében a pontfelhők egy 3D strukturált fényszkennerrel [13] kerülnek generálása, amelyek már bemenetként szolgálnak a pontfelhő-feldolgozási folyamathoz.

Folytatásként a kutatás jelentősége közé tartozik, hogy felhasználásra került egy digitális interfész, amely hatékonyan rögzíteni és vizualizálni képes a hegesztési varrat keletkezése közben a hegesztési robot által generált adatokat valós időben. Ez magában foglalja a geometriai koordináta értékek és a villamos paraméterek valós idejű gyűjtését és megjelenítését, hogy a hegesztési folyamat minden aspektusa pontosan nyomon követhető legyen.

Egy hattengelyes hegesztőrobothoz tervezett virtuális robot, a strukturált fényszkenner kimeneti termékeivel párosítva, további lehetőségeket adnak a minőségellenőrzési lehetőségekhez. A valós idejű adatgyűjtés és vizualizáció fontos mert lehetővé teszi a hegesztési folyamat során felmerülő problémák azonnali azonosítását és elemzését, ami hozzájárul a folyamat hatékonyságának és minőségének javításához.

A rögzített adatok, mint például a geometriai koordináta értékek (x , y , z , R_x , R_y , R_z) és a villamos paraméterek (Volt, Amper, hegesztési sebesség) adatai, ha adottak, felmerülhet kérdésként, hogy felhasználhatók-e szimulációs környezetben is? Lehetővé teszi-e a hegesztési folyamatok pontos modellezését és elemzését? Segít-e az optimális hegesztési paraméterek meghatározásában és a folyamatok további finomhangolásában?

A kutatásom során a hegesztési kísérlet teszt darabjainak technológiai paramétereit vizsgálva, az a céloom, hogy a hegesztési folyamatok autonóm irányítását és optimalizálását, adat-vezérelt gyártási keretrendszerrel támogassam. A bemutatott rendszer képes a hegesztési robot mozgásának és hegesztési paramétereinek valós idejű megjelenítésére, a keletkezett adatok összegyűjtésére és rögzítésére. Fontos, hogy ezeket az adatokat a 3D technológiás és 2D alkalmazásokkal gyűjtött információkkal hatékonyan integrálni tudjuk.

A kutatás célja és jelentősége továbbá abban rejlik, hogy egy olyan innovatív keretrendszert kerüljön felhasználásra, amely lehetőség biztosít a következők szerint:

1. **Hegesztési hibák felismerése és azonosítása:** A kutatás célja a gyártási folyamatok során előforduló hibák felismerése és azonosítása, ami alapvető követelmény a minőségirányítási rendszerekben.
2. **Ipar 4.0 követelményeinek való megfelelés:** A kutatás célja, hogy javítsa a hegesztési folyamatok hatékonyságát és minimalizálja a hibákat. Ez magában foglalja a hegesztési paraméterek valós idejű monitorozását és optimalizálását.
3. **Minőségbiztosítás és felügyelet:** A kutatás célja a digitális iker technológia előkészítése a hegesztési folyamatok valós idejű monitorozására és optimalizálására.

1.3 A disszertáció felépítése

A disszertációm felépítése a következők szerint épül fel:

Az első részben, a bevezetőben, röviden bemutatásra kerül a kutatás motivációja és háttere. Ez magában foglalja a kutatás indoklását, azaz miért fontos és releváns a téma, valamint a kutatási kérdéseket és a hozzájuk kapcsolódó célokat. A kutatási kérdések meghatározzák, hogy milyen konkrét problémákat kíván a kutatás megválaszolni, és mi a kutatás célja.

A második fejezetben az irodalomkutatási rész található, amely ismerteti a kutatáshoz kötődő korábbi kutatásokat és a kapcsolódó elméleti háttereket.

Ez a rész bemutatja, hogy milyen korábbi munkák és elméletek szolgáltak alapul a kutatáshoz, valamint kifejti a kutatáshoz kapcsolódó rések, azaz azokat a területeket, ahol még hiányosak az ismeretek és további kutatásra van szükség.

Ezt követően a kutatási módszertan kerül bemutatásra, amely részletezi, hogy milyen módszereket és eszközöket használtak a kutatás során. Végül, a publikációk rövid összegzése és bemutatása következik, amely áttekintést nyújt a kutatás során készült publikációkról és azok főbb eredményeiről.

Ez a rész kifejti az adatgyűjtési módszerek körülményeit és azok hátterét, valamint bemutatja a valós idejű adatvizualizációt. Az adatgyűjtési módszerek részletezése magában foglalja, hogy milyen adatokat gyűjtöttek, hogyan gyűjtötték azokat, és milyen eszközöket használtak az adatok elemzéséhez. A valós idejű adatvizualizáció bemutatása pedig azt mutatja be, hogy hogyan jelenítették meg az adatokat a kutatás során.

Végül, a publikációk rövid összegzése és bemutatása következik, amely áttekintést nyújt a kutatás során készült publikációkról és azok főbb eredményeiről.

A negyedik fejezetben részletesen összefoglalásra kerülnek a publikációs eredmények és a kapcsolódó tézispontok. Bemutatásra kerül a 4 publikációhoz kötődő eredmény és a kutatáshoz kapcsolódó, de tézispontokkal nem összekapcsolt publikáció és könyvmegjelenés is.

A befejező fejezetekben összegzésre kerülnek a kutatással kapcsolatos főbb megállapítások, következtetések és javaslatok a kapcsolódó jövőbeli kutatásokra nézve. Ez a rész összefoglalja a kutatás legfontosabb eredményeit és következtetéseit, valamint javaslatokat tesz a további kutatások irányaira és lehetőségeire.

2. Irodalmi összefoglaló

2.1 Korábbi kutatások összegzése

Az elmúlt évtizedekben az ipari digitalizáció iránti érdeklődés jelentősen megnőtt. A 2011-től megjelenő negyedik ipari forradalom célja az automatizálás, a működési termelékenység és a hatékonyság magasabb szintje elérése a fizikai és a virtuális világ összekapcsolásával. Az ipari értékteremtés a digitális átalakulás részeként tehát jelentős változásokon megy keresztül, amelynek vezérfogalma az Ipar 4.0, amely egy 2013-as német finanszírozási kezdeményezésből alakult ki, világszerte számos megfelelő programmal. Célja, hogy a hagyományos iparágakban a számítógépesítést és az összekapcsolhatóságot hozza létre. Termelési szempontból Martin és Schäffer az I4.0-t úgy definiálja, mint a munkadarabok intelligens áramlását gépről gépre egy gyárban, amelyet a gépek közötti valós idejű kommunikáció segít. Ebben a környezetben az I4.0 intelligenssé és alkalmazkodóvá teszi a gyártást, rugalmas és együttműködő rendszereket használva a problémák megoldására és az optimális döntések meghozatalára. Ez a fejlesztés az intelligens termékek, intelligens folyamatok és intelligens eljárások létrehozására összpontosít. A cégek várhatóan növelik digitalizációjuk szintjét, együttműködve digitális ökoszisztémákban az ügyfelekkel és beszállítókkal [14].

Ipar 4.0 technológiák, CPS

Az I4.0 megjelenése óta a kutatói közösség különféle megközelítéseket használ a kötődő fogalmakkal kapcsolatban. A nagyközönség azonban összezavarodhat az e téren való megértés hiánya miatt. Tisztázni kell az I4.0-val kapcsolatos fogalmakat és technológiákat (1. ábra).

Az Internet of Things (IoT) egy olyan koncepció, amely az internetkapcsolatot kiterjeszti a mindennapi tárgyakra, így azok csatlakoztatott eszközökké válnak. Az IoT lényege, hogy milliárdnyi intelligens objektumot telepítünk, amelyek érzékelik a környezetüket, adatokat gyűjtenek, továbbítanak és feldolgoznak, majd visszajelzést adnak a környezetüknek. 2021-re várhatóan körülbelül 28 milliárd csatlakoztatott eszköz lesz [14].

Az IoT lehetővé teszi a nem szokványos tárgyak internetkapcsolatát, javítva ezzel az iparágak és a társadalom fenntarthatóságát és biztonságát.

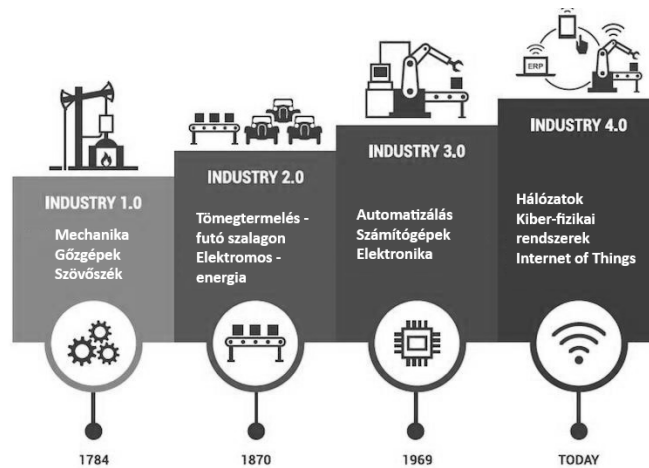
Ez a technológia hatékony interakciót tesz lehetővé a fizikai világ és annak digitális megfelelője között, amit kiberfizikai rendszernek (CPS) nevezünk. Az IoT-t gyakran ábrázolják a mai társadalmi kérdések, mint például az okos városok, intelligens szállítás, szennyezésfigyelés és kapcsolt egészségügy megoldásaként.

Az IoT-kommunikáció rugalmasságát és méretezhetőségét jellemzően vezeték nélküli kapcsolatok biztosítják. Korábban az ipari alkalmazásokban használt vezeték nélküli technológiák ad hoc megoldásokon alapultak, de mostanra megjelentek az ipar számára kialakított szabványok, mint például a WirelessHART és az ISA100.11 [15]. Azonban ezek a technológiák korlátokkal szembesülnek a skálázhatóság és lefedettség tekintetében.

Az IIoT alkalmazások viszonylag kis átviteli sebességet és kapacitást igényelnek csomópontonként, de fontos, hogy nagyszámú eszközt csatlakoztassanak alacsony költséggel és korlátozott hardverképessegekkel. Az IIoT fejlődésével kapcsolatos kulcsfontosságú kihívások közé tartozik az energiahatékonyság, valós idejű teljesítmény, együttélés, interoperabilitás, valamint a biztonság és adatvédelem.

Több szerző szerint az I4.0 a Cyber-Physical Systems (CPS) termelésnek tekinthető, amely heterogén adatok és ismeretek integrációján alapul. Ez egy olyan gyártási folyamatként foglалható össze, amely integrált, adaptált, optimalizált és szolgáltatás-orientált, algoritmusokkal, Big Data-val (BD) és olyan fejlett technológiákat használ, mint a tárgyak internete (IoT) és a szolgáltatások (IoS), Ipari automatizálás, kiberbiztonság (CS), felhőalapú számítástechnika (CC) és intelligens robotika [16].

A kiberfizikai rendszerek (CPS), más technológiák és koncepciók mellett, különös jelentőséggel bírnak ebben a folyamatban, mivel általános koncepciójuk a számítás és a fizikai folyamatok integrálása. A beágyazott számítógépek, valamint hálózatok követik a fizikai folyamatokat, támogató háttérként a CPS kiterjedt alkalmazási lehetőséget kínál [17] az ipari területen [18]. Ebben hozzájárulnak többek között olyan használati esetek megvalósításához, mint a rendszerek és folyamatok valós idejű monitorozása és vezérlése, a prediktív karbantartás, valamint az ember-gép együttműködés kiterjesztése, és ezáltal a termelés, a termékek és a termékek optimalizálását segítik elő a fokozott hatékonyságú szolgáltatások [19].



1. ábra Ipari technológiák [20]

A kiber-fizikai rendszerek (CPS) szerepe az ipari automatizálásban jelentős. Ezek a rendszerek integrálják a fizikai folyamatokat a számítógépes vezérléssel és kommunikációval, így képesek lesznek a következőkre:

- Adatfeldolgozás és elemzés: nagy mennyiségű adat gyors és hatékony feldolgozása, ami lehetővé teszi a valós idejű döntéshozatalt.
- Mintázatfelismerés: A neurális hálózatok segítségével képesek felismerni az adatomintázatokat, ami segít az anomáliák észlelésében és a hibák előrejelzésében.
- Automatizálás: lehetővé teszik a folyamatok automatizálását, csökkentve az emberi beavatkozás szükségességét és növelve a hatékonyságot.

Industrial - Internet of Things (IoT és IIoT)

Az ipari digitalizáció, az IoT (Internet of Things), a mesterséges intelligencia és az adattudományok integrálásával új lehetőségeket teremt a gyártásban. A tudományterületek találkozása a korábban ismert digitális korlátokat megpróbálja átlépni [21].

A tárgyak internete (IoT) gyökeres változást hoz az informatika területén.

Ez az új szemléletmód összekapcsolja a fizikai "tárgyakat" az internet már amúgy is hatalmas hálózatával. Az internet szabványos protokollokat (TCP/IP) használ, hogy több milliárd felhasználót szolgáljon ki.

A legkülönbözőbb nyilvános, magán-, tudományos, üzleti és kormányzati hálózatokon keresztül, amelyeket elektronikus, vezeték nélküli és optikai hálózati technológiák széles skálája köt össze [22]. Az IoT erre az alpra építve kiterjeszti a kapcsolatot a mindennapi tárgyakra is.

Az IoT egyik részhalmaza az Ipari IoT (IIoT), amely a gépek közötti (M2M) kommunikációt és ipari automatizálási technológiákat foglalja magában [23 iiot]. Az IIoT lehetővé teszi a gyártási folyamatok jobb megértését, ezáltal hatékonyabb és fenntarthatóbb termelést biztosítva [24].

Az Internet of Things (IoT) és az Industrial Internet of Things (IIoT) technológiák jelentős hatással vannak a modern iparra és gazdaságra. Az IoT nem csak a legújabb eszközök, például hangvezérelt hangszórók vagy intelligens termosztátok összekapcsolására szolgál, hanem egyre inkább összefüggő társadalmat hoz létre. Az olyan technológiák, mint a felhőalapú számítástechnika, a mesterséges intelligencia és az olcsó érzékelők, valamint a nagy adatok, mind hozzájárulnak az új ipari generáció hatékonyságához és energiaellátásához [25].

Az IIoT különösen nagy hatással van olyan iparágakra, mint a gyártástechnológia, a bányászat és a szállítás. Az IIoT lehetővé teszi az Ipar 4.0-ra való gyors átállást, amely újra-definiálja a gyártást a következő generáció számára, nagyobb hatékonyságot, kiváló minőséget, csökkentett rezsit és jobb biztonságot biztosítva.

Az IoT, az IIoT és az Ipar 4.0 szorosan összefüggő fogalmak, de nem használhatók felcserélhetően. Az IoT inkább fogyasztói IoT-ként ismert, míg az IIoT az ipari eszközök, gépek és vezérlőrendszerek összekapcsolásáról szól az információs rendszerekkel és üzleti folyamatokkal. Az IIoT lehetővé teszi a hatékonyabb termelést és új szolgáltatások kialakítását, míg az IoT rugalmasabb, lehetővé téve az ad hoc és mobil hálózati struktúrákat [26].

Az IoT (Internet of Things) és az IIoT (Industrial Internet of Things) közötti különbség abban rejlik, hogy míg az IoT a fizikai tárgyak vezetékes és vezeték nélküli hálózatokon keresztüli összekapcsolását jelenti, addig az IIoT az ipari érzékelőkkel és kapcsolódó szoftverekkel összekötött összetett fizikai gépekkel foglalkozik [27].

Az IIoT vagy az Ipar 4.0 hatalmas lehetőségeket kínál az egyszerű és ismétlődő munkák, mint például a gyártási összeszerelés, adminisztráció, minőség-ellenőrzés és tervezés felváltására.

Egy friss jelentés szerint az Ipar 4.0 összképe nem tűnik rossznak, sőt, nagyon előnyös lehet bizonyos munkaköri profilok, például az IT és a K+F számára. Az IIoT technológia növeli az új termékajánlatok és üzleti modellek hasznosságát, mint például a gépek szolgáltatásként való nyújtása vagy a helyszíni 3D nyomtatás.

Az IoT eszközök nemcsak távolról kapcsolhatók be és ki, hanem "okos" eszközök is, amelyek önfeldolgozó egységekkel rendelkeznek, többféle technikával képesek információt cserélni, és szabályozhatják a teljes hálózatot, beleértve az internetet is. Az IIoT ezt új szintre emeli, mert rendszert és szabványt biztosít az IP-n (Internet Protocol) keresztüli univerzális összekapcsoláshoz. Az IP az interneten keresztüli információcsere kulcsa, függetlenül attól, hogy milyen típusú eszköz végzi az adatcserét.

Az IIoT könnyen kapcsolódik a gépi tanuláshoz és a Big Data technológiához [28] is, valamint a programozható logikai vezérlőket (PLC) és a felügyeleti ellenőrzést és adatgyűjtést (SCADA) is segíti [29scada]. Ezek az automatizálási technológiák öndiagnózist és helyreállító képességet valósítanak meg. Az IIoT szakértői szerint ezek a technológiák nagyban javítják a minőségellenőrzést, fenntartják a fenntarthatóságot és a zöld gyakorlatokat, valamint az ellátási lánc menedzsmentet és hatékonyságot.

Az IoT átalakulása tehát a kereskedelmi szintről az ipari szintre óriási változást hoz az iparág hatékonysága és folytonossága tekintetében világszerte.

Adatvezérelt gyártás, MES

Mivel egy adatvezérelt autonómgyártósor az IEC (Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság szabványrendszere) [30] alapján az automatizálási piramis szintjei szerint épül fel.

A szabvány fő célja, hogy keretet biztosítson az információs rendszerekből származó adatok integrálására különböző hierarchikus szinteken. Erre több okból is szükség van: a különböző szintű rendszerek eltérő céljai, a rendszerek által végzett feladatok összetettsége, valamint a tranzakciók végrehajtásának és adatgyűjtésének időszaka vagy gyakorisága miatt. Az információs inkompatibilitás kiküszöbölhető a modellek és az információk továbbítására és összesítésére szolgáló objektumok meghatározásával a különböző információs szintek között.

A szabvány leírja az operatív szintű irányítás során használt fő erőforrások modelljeit, amelyekről információkat gyűjtenek és összesítenek.

Beleértve a *berendezésmodell*, *anyagmodell* és *személyzetmodell* részeket is. Ezek a modellek logikailag egyesülnek a *folyamatszégmens* (munkahely) modelljében.

Ezek az erőforrások a működés definíciós modelljeinek alapját képezik, amelyek az operatív tevékenységek sorozatát (termékgyártás, karbantartás, minőségirányítás vagy készletgazdálkodás), a termelési kapacitást, a tervezést és a válaszokat foglalják magukban.



2. ábra MES Gyártás támogató rendszer

Az operatív szintű irányítás modellje bevezeti a *műveleti szégmens* (vagy művelet) kifejezést, amely egy logikai egységet képvisel a berendezési, anyagi és személyi specifikációk alapján (meghatározza, milyen típusú berendezéseknek, anyagoknak és személyzetnek kell részt venniük a műveletben). A műveletek definíciója társítva van a műveleti szégmensek listájával (műveletek listája). A műveleti szégmens egy folyamatszégmensnek felel meg, azaz egy adott műveletet egy adott munkahelyen kell végrehajtani. Hasonlóan a műveleti szégmens specifikációihoz, vannak folyamatszégmens specifikációk is, amelyek meghatározzák, hogy milyen berendezésnek, anyagnak és személyzetnek kell rendelkezésre állnia egy adott munkahelyen.

Az autonómia elérése több komponens egyidejű fejlesztését igényli. Ha a hegesztőgyártást szűkebb értelemben a gyártástechnológiai rendszerek közé soroljuk, akkor ezek a komponensek lehetnek a komplex információs rendszer szabványainak és irányelveinek kezelésére tervezett dokumentumkezelő modulok [31]. Kétféleképpen lehet megközelíteni ennek a modulnak a működését informatikai oldalról. Vannak azok a dokumentumok, amelyek külső szolgáltatóktól érkeznek, amelyekhez egy webes megoldás, például egy szolgáltatásorientált architektúrán alapuló webes alkalmazás lehet megfelelő. Illetve vannak a gyártási folyamat során keletkező -várhatóan- elegendő számú dokumentumok is.

A termelés minőségének garantálásához, ezeket egy adatbázis-kezelő rendszeren keresztül kell kezelni.

A megfelelő adattudományi eszköz azonban minden esetben segít a termelési rendszer alján keletkező adatok vizualizálásában, hogy támogassa a rendszer tetején lévő termelési mechanizmust. Az informatikai oldalról való megközelítést a MES információs rendszerrel támogatható [32].

A dokumentumkezelő modulok

Mivel a dokumentumok felépítése és összetettsége folyamatosan változnak, ezért kritikus fontosságú a verziókövetés képessége. A rendszernek képesnek kell lennie az egyes változatok nyomon követésére, valamint a változások okának dokumentálására.

A dokumentumkezelő rendszernek képesnek kell lennie integrálódni más vállalati rendszerekkel, például az ERP (Enterprise Resource Planning) rendszerrel, a PLM (Product Lifecycle Management) rendszerrel [33, 34] vagy a CRM (Customer Relationship Management) rendszerrel [35].

A termelési adatok minősége is alapvető fontosságú az elemzések és döntések meghozatalához. Az adattisztítás és -validálás folyamatait lehetőség szerint automatizálni kell.

Az adatbázisban rejlő információk kinyeréséhez adatbányászati módszereket kell alkalmazni. Ez lehetővé teszi a rejtett összefüggések felfedezését és a prediktív modellek létrehozását.

Kutatásomhoz kapcsolódóan fontos a prediktív karbantartás szempontjából az előre jelezhetőségi képesség és a minőség-ellenőrzés feladatköre. Előbbi segítségével a gépi meghibásodások csökkenése várható, így minimalizálható a termelőkiesés. Utóbbi támogatásával a gépi látás és a mélytanulás segítségével a termékek hibáit automatikusan fel lehet ismerni.

Folyamatoptimalizáláshoz és önálló döntéshozatalhoz segítség lehet az adatvezérelt döntéshozatali képesség, amely igénybe veszi a felhőtechnológiák adta rugalmasságot és a mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásokat, biztosítva a termelési folyamatok folyamatos finomhangolását.

A hozzáférés-vezérlés tekintetében a rendszernek szigorú hozzáférési szabályokat kell érvényesítenie, hogy megvédje a bizalmas információkat (nem mindenki jogosult minden dokumentumhoz).

Az érzékeny termelési adatok védelme érdekében megfelelő biztonsági intézkedéseket kell tenni (pl. adattitkosítás, hozzáférés-vezérlés). A növekvő digitalizációval együtt járó kiberbiztonsági kockázatok kezelése elengedhetetlen.

A termelési rendszerek informatikai elemei kulcsfontosságúak az autonóm gyártás megvalósításához. Az adatgyűjtés, az adatfeldolgozás, az adatanalízis és a döntéshozatal integrált rendszerének kiépítése komplex feladat, amely számos technológiai és szervezeti kihívást rejt magában.

Manufacturing Execution System (MES)

Informatikai oldalról a termelési rendszer architektúrájában, de különböző alkalmazások (pl.: neurális hálózatok) megvalósításai is támogatják, amelyek előre jelzik/becsülik/javasolják például a műszaki paraméterek helyes megválasztását, lépéseket téve egy autonóm termelési rendszer létrehozása felé.

A Manufacturing Execution System (MES) egy olyan információs rendszer, amely összekapcsolja, felügyeli és irányítja a gyártási rendszereket és a műhelyben vagy gyárban keletkező adatfolyamokat. A MES fő célja, hogy biztosítsa a gyártási műveletek hatékony végrehajtását és javítsa a termelés kibocsátását. Számos, a gyártási környezetben felmerülő probléma megoldható a MES segítségével [36].

A valós idejű adatok gyűjtése és szolgáltatása számos előnnyel jár. Az adatkezelés és a számítástechnika fejlődése elősegítette a MES növekedését. Az elmúlt két évtized erős piaci versenye rávilágított a rendszer nyújtotta előnyökre. [37,38].

A MES továbbfejlesztett erőforrás-kezelést, integrációt és láthatóságot biztosít a dokumentum- és termékellenőrzésen túl, ami végső soron magasabb teljesítményt és minőséget eredményez. Ezek az előnyök szilárd és versenyképes pozícióba helyezik az örökbefogadó vállalatot, és elősegítik a MES gyors elfogadását. [39,40].

Hogyan viheti át egy vállalat meglévő gyártási környezetét a MES-hez való interfészhez, és hogyan irányíthatja a megvalósítás több szakaszát? Az információhiány meghosszabbította a MES integrációját az átlagos kis- és középvállalatokban. A probléma megoldásához nemcsak a MES-t kell érteni, hanem minden egyéb, a megvalósítást befolyásoló tényezőt is, mint például:

- A szoftver/hardver típusa és architektúrája
- Az érintett személyek és gépek
- A jelentéskészítéshez és a funkcionalitáshoz szükséges specifikációk

A gyártási környezet manapság rendkívül összetett és folyamatosan változó. A MES figyelembe veszi és ellenőrzi egy tipikus üzemi műhely kritikus részleteit, amelyek túlmutatnak a tervezési rendszereken és a fő ütemezésen.

Big Data, Machine Learning

A szenzorok segítségével különböző minőségű és mennyiségű adat gyűjthető a hegesztési folyamatról, például hőmérséklet, feszültség és áramerősség. Ezeknek az adatoknak az elemzése lehetővé teszi a hibák előrejelzését és a folyamat optimalizálását [41]. A mesterséges intelligencia által kínált lehetőségek is támogatják ezt a folyamatot.

A generált adatok hatalmas mennyisége különböző típusú, egymással összefüggő heterogén objektumokból származhat [42]. Ezt a hatalmas adatot strukturált, félig strukturált és strukturálatlan adatok írják le, amelyeket Big Data-nak (BD) nevezünk. Az adatok megfelelő értékének kinyerése érdekében ezek tárolása és elemzése jelentős időt és pénzt igényel [43].

Az Internet of Everything korszakában a fizikai eszközök internetre való csatlakoztatása és az új technológiák generációja lehetővé teszi az adatok gyűjtését és tárolását. A BD alapvető jellemzője az adatelemzés, amely nélkül a BD-nek nincs sok értéke [44]. A BD szisztematikus útmutatást nyújthat a termelési tevékenységekhez a termék teljes életciklusa során, költséghatékony és hibamentes [45] folyamatokat biztosítva, valamint segíti a vezetőket a döntéshozatalban és az üzemeltetéssel kapcsolatos problémák megoldásában. A BD használata üzleti előnyt jelent a hozzáadott érték létrehozásának lehetősége révén [46].

A gyártási területen a Big Data (BD) folyamat megértése és a mérnöki szempontok értéket adnak a BD-elemzésnek [47]. Ezek a szempontok egymással összefüggésben vannak, és az alkalmazott BD térfogatok relativitásával minden méret függ egymástól [48]. Az adatok feltárásához fejlett adatelemzésre van szükség, amely magában foglalja a gépi tanulást, előrejelzési modelleket és más módszereket. Ezek az elemzések lehetővé teszik a hatalmas adatmennyiségből származó tudás kinyerését, amely segíti a gyártókat a termék életciklusának különböző szakaszainak megértésében.

A BD elemzése segíthet azonosítani és megszüntetni az IoT által generált adatok szűk keresztmetszeteit [49]. A BD lehetőséget kínál [50] a mai gyártási paradigmától az intelligens gyártásig való átmenetre, segítve a gyártókat abban, hogy racionálisabbak, tájékozottabbak és reagálóbbak legyenek a döntéshozatal során. Ezek a BD jellemzők növelik a gyártás versenyképességét a globális piacon.

A gépi tanulás révén a rendszer képes megtanulni felismerni a hibákat rádiógráfiai képeken, termográfiai felvételeken, vagy akár a hegesztési varratok alakján és a hegesztés hangján alapulva. A robotok is előtérbe kerülnek a reprodukálási képességeik miatt.

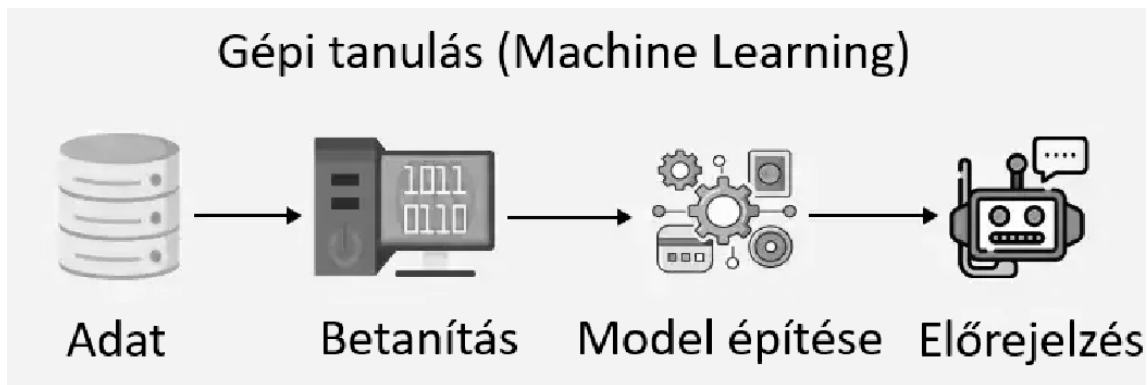
Egy hegesztő robot precízen és ismétlődően képes elvégezni a feladatokat, így a hegesztés és az ellenőrzés is automatizálható. Ha ezek a feltételek adottak, a vizuális ellenőrzés fejlesztése megkezdődhet. A számítógépes látás segítségével a hibák automatikus detektálása lehetséges, akár a hagyományos vizuális ellenőrzés kiegészítéseként, akár annak teljes helyettesítéseként.

A korábbi rendszertechnikai fejlesztésével elindult a mélytanulási algoritmusok elterjedése is, ami nagymértékben felgyorsítja az autonóm gyártórendszerek további fejlesztését (3. ábra), a gyártástechnológiai területen is használható támogatási irány hozzájárulnak a gyártott alkatrész megfelelőségének értékeléséhez is [51].

A gépi tanuláson alapuló megközelítések számos előnyt kínálnak a hibák felismerésében a korábbi módszerekhez képest. A nagy mennyiségű adat elemzésére és olyan minták felismerésére való képességük, amelyeket emberi szemmel nehéz lenne felismerni, előrelépés a pontosság és a megbízhatóság terén [52].

Korábbi módszerek, mint például a statisztikai elemzés és a szabályalapú rendszerek gyakran kevésbé pontosak és megbízhatóak, mivel nem képesek az adatokat hasonló mélységben elemezni. Ezek a módszerek gyakran statikusak, és nem tudnak alkalmazkodni az új adatokhoz vagy a változó körülményekhez, ami korlátozza hatékonyságukat. A valós idejű feldolgozás képes az adatok valós idejű visszacsatolására, feltéve, hogy nincsenek hálózati szűk keresztmetszetek vagy lassulások [53].

A gépi tanulás adaptivitást biztosít, ami azt jelenti, hogy folyamatosan képes tanulni az új adatokból, és alkalmazkodni a változó körülményekhez. Ez azt jelenti, hogy a rendszer idővel pontosabbá és hatékonyabbá válik. Ez különösen fontos a hegesztési folyamatoknál, ahol a hibák gyors felismerése és kijavítása a kritikus.



3. ábra Machine Learning folyamata [54]

A hegesztés minőségbiztosítási területe, mint kritikus fázis, különösen profitálhat ebből a fejlődésből [55]. Egy autonóm gyártósori környezetben a hegesztés minőségellenőrzése mindig is összetett feladatnak számít, a hegesztés komplexitása miatt, amely számos változótól függ, mint például az anyagok, a hegesztőparaméterek, a környezeti feltételek [56]. Ezáltal nehéz egyetlen, univerzális minőségellenőrzési módszert kidolgozni. Szembe találkozhatunk erre a területre fókuszálva a vizuális ellenőrzés korlátaival is.

A hagyományos, emberi szemmel végzett vizuális ellenőrzés időigényes, szubjektív és hajlamos a hibákra. Továbbá megjelenhetnek rejtett hibák, sok hegesztési hiba a felület alatt rejtőzik, és csak fejlett röntgenezéshez kötődő, lassú vizsgálati módszerekkel detektálható.

Az autonóm gyártáshoz viszont valós idejű, automatizált és megbízható minőségellenőrzés szükséges. Ebben a digitalizáció segíthet a kinyert adatok gyűjtésével és azok elemzésével.

A hegesztésnél alkalmazott ML technikák előnyei

Az ML algoritmusok nagy előnye a nagy pontosságra való képesség elérése, olyan finom eltéréseket is képes felismerni, amelyeket az emberi szem nem észlel, továbbá így lehetővé teszi a gyors minőségellenőrzést, valós időben elemezi a nagy mennyiségű adatot [57].

Az ML algoritmusok nem befolyásolhatók szubjektív tényezőkkel, így a döntéseik mindig következetesek, az ML segítségével automatizálható a minőségellenőrzési folyamat, ami csökkenti a hibalehetőséget és növeli a hatékonyságot [58].

Az ipari digitalizáció tehát jelentős potenciált rejt magában a hegesztés minőségének javításában és az autonóm gyártás megvalósításában. Azonban számos kihívással is szembe kell nézni, amelyek megkövetelik a kutatók, mérnökök és a gyártók közös erőfeszítéseit.

A gépi tanulási algoritmusok a hegesztési folyamat során keletkező nagy mennyiségű adatot használják fel a hibák felismerésére és a minőség előrejelzésére [59].

Az alapvető lépések az adatgyűjtéssel indulnak. A hegesztési folyamat során különböző érzékelők segítségével (pl. kamera, hőkamera, erőmérő) nagy mennyiségű adatot gyűjtenek. Ezek az adatok lehetnek képek, videók, numerikus értékek. Az összegyűjtött adatokat elő kell készíteni a gépi tanulási modell számára. Ez magában foglalja az adatok tisztítását, normalizálását, és esetleg a dimenziócsökkentést.

Az előkészített adatok alapján kiválasztanak egy megfelelő gépi tanulási algoritmust (pl. konvolúciós neurális hálózat, támogató vektor gép).

Az algoritmus egy matematikai modellt hoz létre, amely képes a bemeneti adatok és a kimeneti változó (pl. hiba vagy nem hiba) közötti összefüggést leírni. A modell betanításához a rendelkezésre álló adatok egy részét használják. A modell paramétereit iteratív módon finomítják, amíg a lehető legpontosabban képes előre jelezni a kimeneti változót. A betanított modellt egy független adathalmazon tesztelik, hogy megbecsüljék a modell általánosítási képességét. Ha a modell megfelelően teljesít, akkor beépítik a gyártási folyamatba, és valós időben képes előre jelezni a hegesztési hibákat [59].

Gyakori ML algoritmusok a hegesztésben a konvolúciós neurális hálózatok (CNN), a képalkatú adatok (pl. röntgenfelvételek, termográfiai képek) elemzésére kiválóan alkalmasak [60].

A támogató vektor gépek (SVM) képesek [61] lineárisan és nemlineárisan szétválasztani az adatokat különböző osztályokba (pl. hibás és hibátlan hegesztések).

A döntési fák pedig egyszerű, de hatékony módszert kínálnak a döntéshozatalhoz. A hegesztésben például döntési fák segítségével lehet meghatározni, hogy egy adott hegesztés megfelel-e a minőségi követelményeknek [62].

Digital twin előkészítése

Jövőbe mutató megoldás lehet, ha egy digitális iker alkalmazásban gondolkodunk. A digitális twin gyakran zavaró lehet a rendelkezésre álló információk tekintetében. Sokan leginkább szimulációs alkalmazásaként ismerik (kutatásom során a virtuális robot felhasználása szintén szimulációs céllal kerül alkalmazásra, becslés céljából).

De ez részleges megközelítés, mivel a digitális iker a valós fizikai rendszer digitális másolataként azonosítható, amely virtuálisan követi a fizikai rendszer viselkedését. Azonban a digitális iker egy optimalizáláson alapuló komplex rendszer is, ahol a fizikai rendszer által virtuálisan követett térben jeleníti meg a gyártásra jellemző adatokat, miközben a háttérben algoritmusok dolgozzák fel az adatokat.

A feldolgozás eredményeit, azaz a technológiai paramétereket [63,64], visszatáplálják a fizikai rendszerre.

[65, 66]. Az adatfeldolgozás valós idejű frissítésekkel valósítható meg, ahol a digitális iker pontosan tükrözi az aktuális állapotot és pozíciót az összegyűjtött jelek függvényében. Az adatfeldolgozás azonban lehet analitikus vagy szimulációs jellegű, ahol a folyamat már átmegegy a folyamatoptimalizálás területére. Ebben az esetben ez jelenleg megelőzést jelenthet karbantartás, finomhangolás, termelékenység javítása és hibacsökkentés [67]. Egy ilyen rendszer létrehozása nagyon összetett feladat.

Először az alkalmazásfejlesztés szintjén kell megközelíteni a rendszertervezést. Ezután az alkalmazások egyszerű keretrendszerben történő futtatásával az egész struktúra folyamatosan fejleszhető. Tanulmányom kísérletet tesz egy digitális interfész alkalmazásával, a vonatkozó adatok gyűjtése mellett, predikciós feladatok kifejlesztésére.

A digitális iker tehát nem csupán egy szimuláció, hanem egy olyan rendszer, amely valós időben követi a fizikai rendszer viselkedését, és optimalizálja a gyártási folyamatokat. Az adatok elemzése és visszacsatolása révén pedig lehetővé teszi a gyártási folyamatok folyamatos fejlesztését és optimalizálását, ami végső soron növeli a termelés hatékonyságát és minőségét.

Az öntanuló hegesztőrobotok intelligens vezérléssel rendelkeznek, és képesek a hegesztési folyamatok optimalizálására. Ezek a robotok figyelembe veszik a külső hatásokat, és képesek a hozaganyag-összetétel, a védőgázáramlás és a szűrőberendezés szükséges elszívási teljesítményének kiszámítására. Az AI-alapú rendszerek képesek valós időben ellenőrizni a hegesztési varratok minőségét, és azonnal jelezni az esetleges hibákat. Ez lehetővé teszi a gyors beavatkozást és a hibák minimalizálását.

Az AI rendszerek képesek nagy mennyiségű adatot elemezni és mintázatokat felismerni, ami segít a hegesztési folyamatok optimalizálásában és a hatékonyság növelésében.

Ezek az innovációk javítják a munkakörnyezet minőségét, csökkentik a működési költségeket és növelik a gyártási folyamatok hatékonyságát.

Az AI alkalmazása a hegesztéstechnológiában tehát jelentős előnyöket kínál a fémfeldolgozó vállalatok számára, és hozzájárul a fenntarthatóbb gyártási gyakorlatok kialakításához

Az ember szerepe az automatizált gyártásban

Az automatizálás rohamos fejlődése ellenére az ember továbbra is nélkülözhetetlen szerepet tölt be a gyártási folyamatokban.

Bár a gépek átveszik a monoton, ismétlődő és veszélyes feladatokat, az emberi munkaerő egyre inkább a magasabb szintű, kreatív és stratégiai feladatokra koncentrálhat. Ilyen feladatokat láthat el, mint az automatizált rendszerek működésének felügyelete, a hibák felderítése és kijavítása továbbra is emberi feladat [68].

(Váratlan) problémamegoldás és döntéshozatal tekintetében elengedhetetlen az emberi intelligencia és kreativitás. Az automatizált rendszerek által szolgáltatott adatok alapján az emberek hoznak (még mindig) stratégiai döntéseket a termelési folyamatok optimalizálásáról.

Emberi feladat továbbá az innováció is. Az új technológiák fejlesztése, az automatizált rendszerek tervezése és programozása. Az automatizált rendszerek bevezetése és üzemeltetése is képzett szakembereket igényel.

Összefoglalva tehát az automatizálás nem jelenti az emberi munkaerő feleslegessé válását, hanem inkább egy újfajta együttműködési modell kialakulását. Az ember és a gép egymást kiegészítve képesek a leghatékonyabb és legversenyképesebb gyártási folyamatokat létrehozni.

A nagy mennyiségű adat kezelése és védelme kiemelt fontosságú. A különböző gyártók és rendszerek közötti interoperabilitás biztosítása érdekében szabványokra van szükség, ezért az emberi szakértelem továbbra is fontos szerepet fog játszani, különösen a komplex problémák megoldásában és az új technológiák fejlesztésében.

2.2 Hegesztési varratok vizsgálata

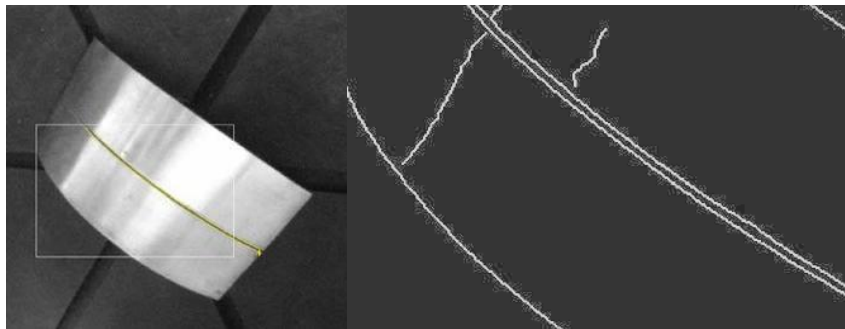
A hegesztéstechnológia az eljárások és variációk széles körét foglalja magában, így a széles körű kutatások tárgyát képezi. A nyersanyagok hegesztés során történő felhasználását alaposan tanulmányozni kell, a kutatások jellemzően az illesztéshez használt anyagok szerkezeti változásaira összpontosítanak [69]. Ezek a kutatások laboratóriumi vizsgálatokat foglalnak magukban a roncsolásos és a roncsolásmentes módszerekkel [70]. Emellett folyamatban van a

varratfelismerés képfeldolgozó algoritmusok (lézeres látáson alapuló) és Kalman-filter segítségével történő pályaoptimalizálással kutatása is [71]. A lézeres látási technikát [72] a tényleges hegesztési varratok adaptív mérésére is használják. Az algoritmus a hegesztési trajektória jellegzetes háromszögének megkonstruálásával nyeri ki az alakjellemzőket [73]. A mesterséges intelligencia területén, a korábban említettek szerint előre lépések és áttörések várhatók [74,75].

Az ipari robotok hegesztési varratainak hatékony felismerését is kutatják a képfeldolgozási technikák alkalmazásaival. Bemutatásra került, hogyan lehet egyetlen képből felismerni a hegesztési varratokat természetes megvilágítási körülmények között.

A kutatás célja egy olyan algoritmus kifejlesztése, amely képes a tompahegesztési varratok (4/a ábra) környékén található hibák (4/b ábra) felismerésére egyetlen képből, anélkül, hogy előzetes információra lenne szükség a varrat helyzetéről. A Canny éldetektáló algoritmus három fő előnnyel rendelkezik:

- Képes a tompavarrat és végpontjainak automatikus felismerésére egyetlen képből.
- Alkalmazható a legtöbb varrat formára, beleértve a sík és térbeli görbéket is.
- Az algoritmus helyi működése miatt érzéketlen a háttérkép változásaira, és jelentősen csökkenti a számítási költségeket.



4. ábra A hegesztési varrat valódi képe (a), és Canny algoritmussal - szélén a repedéssel (b)[76]

Fontos megjegyezni, hogy a vizsgálandó terület mérete befolyásolja a munka hatékonyságát. Minél nagyobb ez a terület, annál kényelmesebb a dolgozónak a képgyűjtés, azonban ezzel együtt nő a varratszélek felismerésének kockázata is. Nyilvánvaló, hogy a nagyobb méret miatt több lesz a hegesztési varrat szempontjából irreleváns képterületet is. A kép jellemzői, mint például az intenzitáseloszlás és a peremek eloszlása, befolyásolják az élek felismerésének eredményét. Általában a valós alkalmazásokban kompromisszumot kell találni a képek gyűjtésének kényelme és a képfeldolgozás kockázata között. A megfelelő méretarány kiválasztása érdekében tesztelték az algoritmus átlagos futási idejét.

A méretarányok 1/4 és 1 között mozognak, de a megfelelő futási idő nagymértékben változott. Az eredményekből szerint, a 0,3 és 0,4-es méretarány viszonylag megfelelő a számításához, amelyek rövid futási időt (60-80 ms) és viszonylag nagy vizsgálati területet eredményez.

A hegesztett kötés megfelelőségének ellenőrzésére szolgáló vizsgálat összetett, a termikus technológiában alkalmazott hőtechnikai folyamatok miatt. A szabványok, a folyamatbiztonság és a gazdasági szempontok fontos tényezők, amelyeket figyelembe kell venni. A vizsgálat rendje szabványosított. A felületi és térfogati eltérések hibakategóriák és kódok segítségével történő felsorolása a hegesztési minőségirányítás egyik jelentős vívmánya [77].

Hegesztett kötéssel szemben támasztott követelmények

A hegesztett szerkezeten belül a legkritikusabbnak a hegesztett kötés tekinthető, bár magának a vizsgálatnak sok esetben az egész szerkezetre ki kell terjednie. A hegesztett kötés kis százalékát jelenti a teljes szerkezetnek, mégis mérvadó. A követelményeket sokféleképpen csoportosíthatjuk, amelyek döntőek lehetnek bármilyen súlyozott kombinációjukban, meghatározva ezzel a kötés, illetve a szerkezet megítélését:

- esztétika, tovább feldolgozhatóság,
- mechanikai és korróziós ellenállás, korróziós
- mágneses, villamos tulajdonság, tömörség,
- méret stb.

Több vizsgálati módszer létezik, melyek közül a tervezői előírásoknak megfelelően a mérnököknek kell kiválasztania a műszakilag és gazdaságilag megfelelőt. Figyelembe kell vennie továbbá, hogy az egyes vizsgálati eljárások között számottevő átfedés van, azonban használhatóságuk, hibakimutathatósági képességük jelentősen különböző. Ezeket a vizsgálatokat meg kell különböztetni abból a szempontból, hogy a gyártás során (gyártás előtt, közben és után) a termék megfelelőségének igazolását szolgálják, vagy az üzemeltetés közben történnek. A termék ellenőrzése kapcsán, az elvégzendő vizsgálatokat a tervezési, gyártási szabványok, szállítási feltételek, szerződési feltételek határozzák meg, a hegesztett kötések, valamint a felhasznált anyagok vonatkozásában is.

Az üzemeltetés időszakában végzett ellenőrzésnek az a célja, hogy adatokat szolgáltatson a berendezés állapotáról, azaz az üzemi igénybevétel hatására esetlegesen keletkezett folytonossági hiányok jelenlétéről, elhelyezkedéséről, méretéről és más jellegzetességeiről az adott berendezés vagy szerkezet integritásának az elemzéséhez.

Ilyen alaposabb elemzések esetén felmerül az igény, hogy vagy a gyártás során, vagy az üzembe helyezést megelőzően, létrejöjjen olyan vizsgálatokon alapuló adatbázis, amely megfelelő viszonyítási alapot jelent a szakemberek számára:

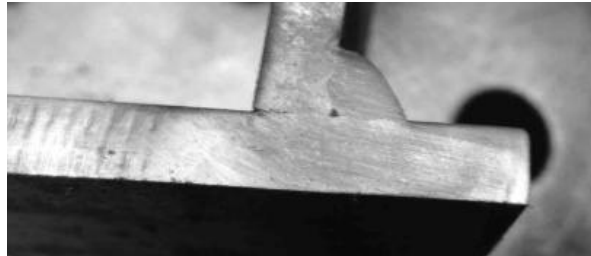
- nullaállapot felmérés
- hibatérkép készítés, roncsolásmentes vizsgálatokról;
- törésmechanikai mérőszámok meghatározása;
- hőmérséklet-ütőmunka görbe felvétele, egy hőmérsékleten megadott ütőmunka érték helyett, a munkapróbákon;
- mesterdarabok készítése; stb.

Az időszakos ellenőrzéseket jellemzően atomerőművek, hőerőművek, vegyipari létesítmények nyomástartó berendezésein, csővezetékein, valamint egyéb hegesztett szerkezetein végzik roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel. A vizsgálatok alapvetően a hegesztési varratokra és azok környezetére terjednek ki [78].

2.2.1. Roncsolásos anyagvizsgálati módszerek

A roncsolásos anyagvizsgálati módszerek a kötés - illetve ellenőrző jelleggel az alapanyag - mechanikai és technológiai tulajdonságait, vagy helyi szilárdsági, törésmechanikai jellemzőit, alakváltozó képességét és szövetszerkezetét határozzák meg [79]. A vizsgálatokat vagy olyan próbadarabokból kimunkált próbatesteken végzik, amelyek a munkadarab varratának folytatásaképpen vagy külön vizsgálati célra készültek (munkapróba). A vizsgálatokhoz a hegesztett szerkezetből kivágott részek is használhatók. Ha a vizsgálat céljára külön próbadarab készül, akkor azt ugyanolyan körülmények között kell hegeszteni, mint magát a szerkezetet. Ezt szakértői vagy minőségellenőri átbélyegzésekkel igazolni is kell. Hőkezelt kötések vizsgálatára szolgáló próbadarabokat a hegesztett kötéssel azonos módon, lehetőleg azzal együtt kell hőkezeltetni. A próbadarabot és a próbatestet úgy kell megjelölni, hogy a jelölés alapján a vizsgálat befejezéséig pontosan meg lehessen állapítani a hegesztett szerkezetben, illetve a próbadarabban elfoglalt helyzetét.

A roncsolásos anyagvizsgálatok közül a felületi vizsgálatokhoz leginkább kötődő mikro- és makrócsiszolat vizsgálat kerül bemutatásra a következőkben (5. ábra).



5. ábra Alkatrész tisztítása mikro és makro csiszolat vizsgálat előtt [80]

2.2.2 Roncsolásmentes (nem destruktív) anyagvizsgálatok

Ha az alkatrész felületén/belsejében lévő hibák, hibakereső anyagvizsgálati módszerekkel vagy roncsolásmentes vizsgálatokkal kimutathatóvá válnak, illetve a vizsgálat elvégzését követően a szerkezeten olyan maradó károsodások nem keletkeznek, melyek bármely módon is korlátozzák a tovább üzemelést, felhasználhatóságot, azokat az eljárásokat szoktuk roncsolásmentes vizsgálati módszereknek nevezni.

Van persze olyan helyzet, melyben maga a szerkezet határozza meg, hogy roncsolásmentesnek tekinthető-e a vizsgálat: okoz-e a vizsgálat zavaró, maradandó károsodást [81].

A hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálatának a célja a kötés, illetve a varrat külső és belső hibáinak, eltéréseinek kimutatása, dokumentálása. A vizsgálatokat a kimutatható hibák szerint is csoportosíthatjuk:

- A felület vagy felület közelében lévő hibák kimutatására a mágneses vagy folyadékos repedésvizsgálat a megfelelő;
- A belső folytonossági hiányok feltárására a radiológiai (röntgen, durvaszerkezeti, radioaktív izotópos), ultrahangos, magnetoinduktív eljárások az alkalmasak.

Mágnesezhető poros vizsgálat esetén a felületre felvitt ferromágneses por az eltérítés helyén feldúsul, ezáltal a folytonossági hiány láthatóvá válik [83].

Ultrahangos vizsgálat

Jellemzően elterjedt az ultrahanghullámok alkalmazása, amelyeket például az erőművekben is alkalmaznak a hegesztési varratok ellenőrzésére. A piezoelektromos kristállyal létrehozott rezgést csatoló közeggel - ami lehet víz vagy olaj - átadjuk a vizsgálandó tárgynak, ahol a longitudinális ultrahanghullámok szinte párhuzamos irányban terjednek. Ilyen lehet a vizsgálati darab hátoldala vagy a folytonossági hiányok is. A vizsgált anyagon áthaladó hullámokat vevőfejjel érzékeljük, melynek elrendezése az ultrahang-rezgéseket keltő adófejjel azonos. Az ultrahang az emberi fül számára nem hallható, 16kHz-100MHz rezgésszámú, nagyfrekvenciájú rezgés [84].

Az ultrahangvizsgálatoknak többnyire két eljárása fejlődött ki, az átsugárzásos és az impulzus-visszhang módszer. Az átsugárzásos módszer esetében az ultrahang keltése külön vizsgálófejekkel történik (külön adófej és vevőfej). A darab egyik oldalán az adófej, a túloldalon pedig a vevőfej található.

Az ultrahang hullámokat keltő adófejből a vizsgált anyagba belépő ultrahanghullámok a berendezés katódsugárcsővének képernyőjén egy bemenő jelet adnak (adójel). A tárgyból akadálytalan áthaladás után kilépő hullámok a vevőfejbe belépve ott ismét villamos rezgésekké alakulnak és egy végjelet (vevőjel) adnak a képernyőn [85].

Az impulzus-visszhang eljárás esetén a vizsgálat az anyag egyik felület felől történik, majd ugyanoda is érkezik vissza. Az ultrahangimpulzus többször megteszi az anyagvastagságnak megfelelő utat, mivel a munkadarab ellentétes oldala (hátfala), hozza létre a visszhangot. A készülékek kijelzőjén a két jel közötti távolság arányosan alakul a vizsgált anyag vastagságával.

A legtöbb anyagvizsgálathoz használt ultrahangkészülék a piezoelektromos jelenségen alapul. Lényege, hogy a kondenzátorlemezek közé helyezett kvarckristály (6.a ábra: x-villamos tengely; y- semleges tengely; z- mozgástengely) a kondenzátor feltöltése után összenyomódik vagy kitágul a töltés jellegének megfelelően.

Ez a jelenség fordítva is fennáll, ha a kristályt összenyomjuk vagy széthúzzuk, akkor változni fog a kondenzátor töltése is. Jobbra látható egy ultrahangos vizsgáló készülék és vizsgálófej (6.b ábra).



6. ábra Piezoelektromos kvarckristály (a), ultrahangos vizsgáló berendezés és vizsgáló fej (b) [86]

Radiográfiai vizsgálat, röntgenezés

A röntgensugarak rendkívül rövid hullámhosszúságú elektromágneses sugarak. Elsősorban térfogati jellegű hibák kimutatására alkalmas eljárás, de kedvező körülmények között képes detektálni síkszerű hibákat is. A vizsgálat elve, hogy kis hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás szilárd testeken, fémeken is áthatol.

Az elektromágneses hullámok a vizsgálandó darabon való áthaladásuk közben valamilyen mértékben elnyelődnek. Az elnyelődés mértéke a munkadarab anyagának gyengítési tényezőjétől és vastagságától függ.

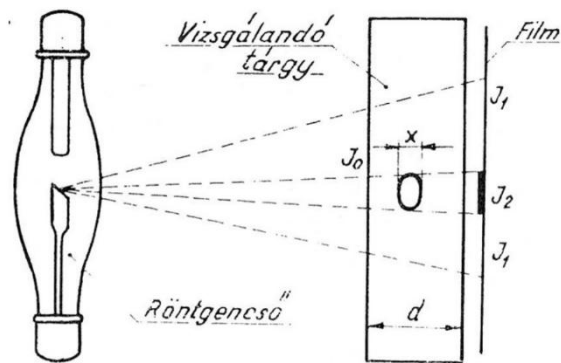
A darab folytonossági hiányai az áthaladó sugárzást kevésbé gyengítik, így a darabból kilépő sugárzás intenzitása nagyobb lesz, melynek detektálásával a hiba helye felderíthető.

A detektálást leggyakrabban erre a célra kifejlesztett röntgenfilmekkel végzik. Egyelőre ritkábban használt módszer a többször felhasználható félvezetőlemez, amelyről a kép egy kiolvasó berendezés segítségével digitális formában kerül rögzítésre.

A vizsgálatok végzése során az egészségre káros sugárzások keletkeznek, az ezekkel kapcsolatos védő intézkedések nehezítik az eljárás alkalmazását. Az ipari gyakorlatban két fő vizsgálati módszert különböztetünk meg a sugárforrások szerint:

- röntgensóvel történő vizsgálat (nem állandó sugárzás),
- radioaktív izotóppal történő vizsgálat (állandó sugárzás).

A belső anyaghiba kimutatása céljára szolgáló röntgensugarakat ma már szinte kizárólag izzókatódos csövekben állítják elő. Működési elvüket a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra Röntgenvizsgálat vázlatai [87]

A röntgensöveknek fűtőtranszformátor biztosítja a katód izzításhoz szükséges áramot. A légritkított röntgensőben - a hálózatra kötött transzformátorokkal - nagyfeszültségű tér kerül létrehozásra az anód és katód között. Az azonos elektromos polaritás biztosítását pedig az egyenirányító csövek és kondenzátorok látják el.

Akusztikus-emissziós vizsgálat

A vizsgálati módszer jellegéből adódóan nem alkalmas közvetlenül hegesztett kötések, varratok vizsgálatára, de alkalmazása nagyrészt hegesztett szerkezeteken történik, (pl. nyomástartó edények) a hibák jelenlétének, helyének, helyzetének meghatározására. A módszer alkalmazásának előnye, hogy a hibát jelző jeleket maga a vizsgálat alkatrész állítja elő, továbbá az akusztikus emisszió-jelenséget mint minőségi és gyártás-ellenőrzési módszert egyszerre lehet alkalmazni [88].

A vizsgálat alapelve az, hogy a szilárdtest atomrácsszerkezetében az igénybevétel gerjesztette atomi mozgások hatására kialakuló feszültség hullámokat, piezo-érzékelőkkel villamos jellé alakítjuk át. Hangimpulzusok jönnek létre, amikor hirtelen rugalmas energia szabadul fel, ha egy fémes szerkezeti anyag alakváltozáson megy keresztül, vagy amikor repedések keletkeznek, illetve tovább terjednek. A vizsgálat mindig egyfajta statisztikus értékeléssel kell, hogy együtt járjon, és igazán eredményesen csak az első terhelés során végezhető el.

A méréshez több érzékelőt kell telepíteni a vizsgálni kívánt tárgy felületére, hogy a megengedhető hangcsillapodás mellett kaphassunk hangemissziót a teljes szerkezetről.

Kapcsolódóan a ferrit tartalom vizsgálat esetén a ferrit és az ausztenit alapvetően eltérő mágnesezési tulajdonságait a további mérési módszerek állnak rendelkezésre a ferrit %-os meghatározására:

- A mágneses tapadós mérésénél egy állandó mágnes leszakítási ereje kerül megmérésre a vizsgálandó anyag felületéről.
- A mágneses telítés módszere során nagy a térerő igény, ami csak kis darabok vizsgálatát teszi lehetővé. Hordozható készülékkel történő vizsgálati változata nem terjedt el.
- A mágneses indukció módszere a vizsgálandó anyag permeabilitásának mérésén keresztül történik. A méréshez a mérendő tárgy felületén egy induktív szonda kerül elhelyezésre, amelyben egy kisfrekvenciás árammal meg táplált gerjesztő tekercs és egy mérőtekercs van [90].

Szemrevételezés

A szemrevételezés vizsgálat (VT – Visual Technic) az egyik legalapvetőbb és az egyik legszélesebb körben alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, melyet az általános felfogás indokolatlanul lekezel.

A hegesztett élek leélezése, a hegesztett kötések más módon nem, vagy csak nagyon körülményesen határozhatók meg. A vizsgálati módszer alkalmazása nem csak a becslés, a szemmérték használatát jelenti, hanem mérőeszközök, idomszerek segítségével történő számszerűsített adatok nyerését is. Alkalmazási köre és célja alapján a következő csoportokra bontható:

- önálló vizuális;
- roncsolásmentes vizsgálatokat kiegészítő;
- állapot-ellenőrző vagy káresetelemző vizsgálatokat kiegészítő vizsgálati módszerek.

A hibák észlelése az emberi szem felbontóképességétől is függ. Általános szabályként megfogalmazható, hogy hosszú ideig tartó vizsgálat során az átlagos emberi szem felbontóképessége 0,1 mm-t meghaladó hibák észlelésére képes [91]. A felismerés nagyban múlik a megvilágítástól a személy tapasztalatától, alkalmasságától és rutinjától. A megvilágítással kapcsolatban elmondható, hogy minimum 500 lux az ajánlott ehhez a típusú vizsgálatához. Az így megkapott eredmények gyakran kiindulópontjai egy későbbi vizsgálati sorozatnak, amelyekkel részletesebb és pontosabb képet kaphatunk a hiba létezéséről. Az eljárással a kismértékű geometriai eltérések, az összezáródott vagy nagyon kicsi repedések, illetve zárványok nem, vagy csak nehezen kimutathatóak. A vizsgálat jól alkalmazható nagyobb méretű térfogatos hibák, jelentős geometriai deformációk, torzulások, nagyméretű felületre kifutó repedések kimutatására.

A vizsgálathoz különböző segédeszközöket használnak, amelyek lehetnek közvetlen hozzáférést, illetve közvetett hozzáférést biztosító eszközök. A közvetlen hozzáférést biztosító eszközök: tolómérők, mikrométer, szögmérő, varratmérő idomszerek, lupék, mikroszkópok, fém mikroszkópok, projektorok, fényképezőgépek. A közvetlenül nem hozzáférhető helyek vizuális megfigyelésére alkalmazzák a különféle endoszkópokat.

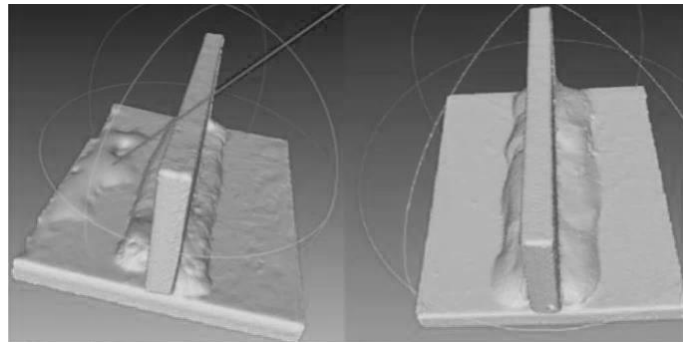
Az ISO 17637:2017 szabvány [92], amely a fémek ömlesztő-hegesztéssel készített kötéseinek szemrevételezéses vizsgálatával foglalkozik, számtalan ajánlást közöl, amelyek közül a lényegesebbek a következők:

1. A körülményekre vonatkozóan, fontos a megvilágítás (min. 350 lx, ajánlott 500 lx), a hozzáférhetőség (max. 600 mm, min. 30°), továbbá megengedett a 3-5x-ös nagyítók alkalmazása.
2. A vizsgálatot végzőre vonatkozóan, a vizsgálatot végző személlyel szembeni követelmények (MSZ EN 473 szerinti minősítés fontos [92], illetve a megfelelő jártasság a szabványokban).
3. A technológia folyamatára nézve, fontos az előkészítés vizsgálata (alak, méret, tisztaság), felülvizsgálat a hegesztés során, és ha ez indokolt akkor a javítás (hibák, alakeltérések, tisztaság, gyökfaragás).
4. A kész hegesztett kötésre vonatkozóan, megfelelő-e a felület (salak eltávolítás, szerszámnyomok, ívgyújtási nyomok); megfelelőek-e a varratalak és méretek, továbbá a gyökoldal.
5. Hegesztést követő hőkezelésre vonatkozóan;
6. A javításokat követő vizsgálatokra vonatkozóan, a vizsgálatoknak a kimunkálásra is ki kell terjednie továbbá a követelményeknek azonosnak kell lennie a nem javított kötések követelményeivel.

Az endoszkópok. használatánál figyelembe kell venni, hogy nehezen ellenőrizhető a színhelyesség, illetve a méretek meghatározása nagy gyakorlatot kíván meg. Az endoszkópok egyes típusainál lehetőség van sztereó előtétek alkalmazásával pontos méretek, profilok megállapítására is.

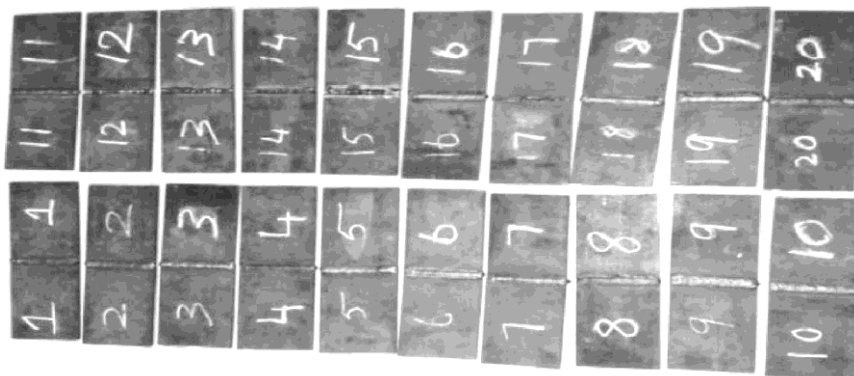
2.3 A kutatáshoz kapcsolódó elméleti háttér

Közelítve a 3D szkennerek világához, kutatási munkám ezen a területen kapcsolódik a roncsolásmentes agyagvizsgálati módszerekhez. Röviden összefoglalva a szemrevételezés kiváltására, mérőeszközök beintegrálása által (pl. 3D scanner) történik az érintésmentes vizsgálat. Cél, hogy a minőség ellenőrzés elősegítése megvalósítható legyen gépi-tanulási módszerek támogatásával is, az algoritmusokkal támogatott 3D pontfelhő illesztéssel és a 2D-s eredménytermékek képfeldolgozásával. Pontfelhő összehasonlításkor tehát (a bemenetet képező pontfelhők egy hegesztő robot által készülnek), egy etalon munkadarab pontfelhőjét kívánom összehasonlítani, a vizsgálni kívánt hegesztett alkatrész pontfelhőjével (8. ábra), keresve a különbözőségeket. A gépi tanulás támogatásával pedig becslést kívánok elvégezni.



8. ábra Etalon modell és vizsgálni kívánt modell pontfelhői MESHLAB programban

A vizsgált hegesztési képeket felhasználva (9. ábra) ami alapján, ha a kamera lát egy képet a gyártósoron, akkor megtudná becsülni, hogy melyik villamos paramétere volt elcsúszva a hegesztőkészüléknek a varrat elkészülése alatt.



9. ábra Gépi tanulás adatbázisának feltöltésére váró hegesztett alkatrészek

A 3D szkennerek használata valóban forradalmasította a modellezést és a mérés technikát. Ezek az eszközök lehetővé teszik, hogy gyorsan és pontosan rögzítsük az alkatrészek háromdimenziós adatait, ami jelentős idő- és energia-megtakarítást eredményez a manuális modellezéssel szemben. A 3D szkennerek alkalmazása számos területen elterjedt, például az iparban, ahol digitális iker létrehozásával lehetővé válik az alkatrészek pontos másolatainak előállítás. Ezáltal a gyári munkások kockázatmentesen gyakorolhatják az alkatrészek szét- és összeszerelését, ami jelentősen megkönnyíti az alkatrészekkel kapcsolatos információk megszerzését.

Az eszközökkel párhuzamosan fejlődtek az informatikai támogatással rendelkező 3D-s technológiák is, és számos kutatási cikk foglalkozik a szkenneléssel, hegesztett alkatrészek szkennelésével és a kapcsolódó vizsgálati háttér által kínált lehetőségekkel.

A 2000-es években az ISO 9000-es tanúsítás [93] már a gyakorlati tapasztalatokon alapuló követelményszinteket határoz meg.

A hegesztési varratok felületének torzulásának elemzésére 3D szkennelést alkalmaztak S960QL acélból [94] készült négyzet alakú próbatesteken, a szkennelés előtt a mintákat tisztították, rögzítették, majd szkennelték. A szkennelést elvégezték mind a felületi hőkezelés előtt és utána is. A folyamat alatt a hegesztési sebesség állandó (40 cm/perc) volt. A felületkezelés utáni hálót összehasonlították az időben korábbi állapottal, illetve a munkadarabot prezentáló CAD modellel, és az eltéréseket színes térképeken ábrázolták.

A legnagyobb torzítást 4,28 kJ/mm-es hőbevitellel, a legkisebbet 1,76 kJ/mm-es hőbevitellel kapták. Következtetésként a vizsgálatok kimutatták, háromdimenziós szkennelés hasznos eszköz a hegesztési hibák monitorozására és elemzésére.

A szabvány három minőségi kategóriát mutat be az egyes eltérések határértékeivel. Egy hegesztett kötés akkor tekinthető megfelelőnek, ha az esetlegesen benne lévő hibák mértéke a határértékeken belül van; ellenkező esetben nem megfelelőnek minősül. Bizonyos esetekben, mint például a repedések, egyik minőségi osztályban sem elfogadhatóak (nem megengedett) [95]. A különböző érintésmentes ellenőrző eszközök fizikai elve, amelyeket számos ipari alkalmazásban sikeresen alkalmaznak a minőségi hibák felismerésére, a képfelismerés és a képfeldolgozás kutatásához tartozik [96].

2.3.1 3D szkennelési technológiák

Alapvetően két fajta beolvasási eljárást különböztethetünk meg, az első az érintkezés alapú (kontakt szkennerek) beolvasás, a második és egyben modernebb, az érintkezésmentes vagy érintésnélküli (nonkontakt szkennerek) beolvasás.

Kontakt szkennerek (CMM)

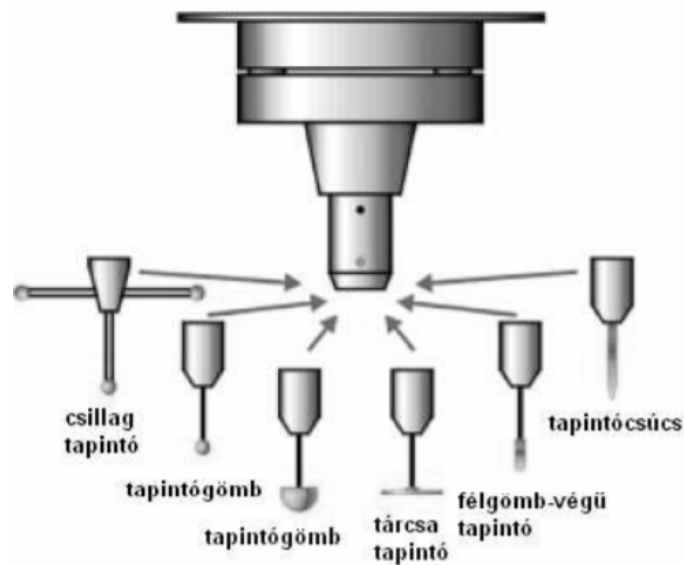
Az érintkezés alapú szkennerek, ahogy a nevük is sugallja, fizikai érintés alapján mérik az alkatrészeket. A legelterjedtebb ilyen technológiát használó mérőberendezés a koordináta mérőgép (Coordinate Measuring Machines, CMM). Ezeket a gépeket az Egyesült Államokban fejlesztették ki olyan nagyvállalatok igényeinek kielégítésére, mint a Boeing és az IBM [97]. Működési elvük az, hogy a mérendő munkadarabról pontokat vesznek fel, majd a számítógép ezekből a pontokból kalkulálja ki a méreteket. A koordináta mérőgépek kulcsfontosságú része a hozzá csatlakoztatott számítógép és a kapcsolódó mérőszoftver.

A fizikai kapcsolat létrejöttéhez a berendezés egy tapintóval rendelkezik, amely a tapintó fejhez csatlakozik. Ez a csatlakozás mágneses összeköttetéssel van megoldva, így egy esetleges ütközés esetén megvédi a tapintót a töréstől, csak elmozdulás történik. Létezik mozgó oszlopos és mozgó asztalos kivitel is, de leggyakrabban portális kivitelben fordul elő. Az oszlopok mozgatása golyósorsó és anya párral történik, az orsók meghajtása szervomotorokkal van megoldva.

A hagyományos mérés technika és a koordináta mérés technika közötti különbség az, hogy hagyományos esetben a vizsgált alkatrész jellemző méretét egy mértékegységgel való összehasonlítás alapján határozzák meg, míg a koordináta mérés technikában a gép tapintója által felvett pontokra elemet illesztenek, és a méretet a számítógép határozza meg.

Számos tapintó létezik, általában gömb kialakításúak (10. ábra). A tapintó eleme többnyire rubintból készül, de létezik hengeres tapintó, lyuktapintó és a tapintó pálca is.

Minden mérőgéphez alap tartozék a nagy pontosságú kalibráló gömb. A kalibráció során meghatározott korrekciós értékeket eltárolják tapintási irányonként.



10. ábra Tapintófajták [98]

Tapintó fejből két típus létezik, kapcsoló-típusú és mérő-típusú. Előbbi a működése azon az egyszerű elven alapul, hogy a tapintó elmozdulásakor az eszközben található kapcsoló jelet ad, a számítógép pedig kiolvassa a mérőrendszer kapcsolás pillanatában felvett értékeit, így határozza meg az adott koordinátát.

Utóbbi esetén a mérő típusú fej saját belső útmérő rendszert használ, képes az elmozdulások megállapítására, így akár alkalmas lehet felületek folyamatos letapogatására.

A tapintó fejek forgathatóak és meghatározott pozícióba állíthatóak a jobb hozzáférés érdekében. Ilyenkor minden pozícióhoz korrekciózásra van szükség, ami azt jelenti, hogy minden pozícióban kalibrálni kell a fejet.

A portálos felépítés zárt szerkezetű koordináta mérőgép nagy munkateret biztosít (11. ábra). Az oszlopok burkolattal vannak ellátva, amely védi a vezetékeket, a levegőt biztosító csöveket, a golyósorsót és a szervomotorokat a szennyeződésektől és az esetleges mechanikai behatásoktól. Az asztal fő funkciója a munkadarab, a tapintó tartó és az oszlopszerkezet tartása. Az asztal anyaga leggyakrabban gránit. Többnyire sötét színűek és tökéletesen feszültségmentesek.

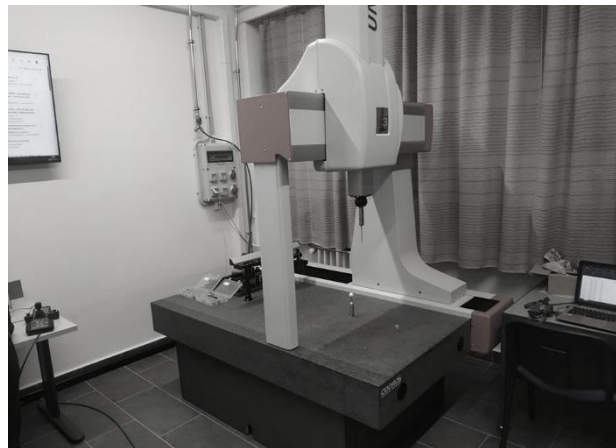
A gránit nagy előnye, hogy nem vezeti az áramot, nem korrodál, továbbá, hogy sérülés esetén könnyen javítható és tisztítható, valamint nagy felületi keménységi tulajdonsággal rendelkezik.

Az asztalt acélszerkezet rögzíti, amely a talajhoz rezgés csillapító rendszeren keresztül csatlakozik.

Az elmozdulás mérésének két módja van: abszolút és növekményes. Az abszolút mérőrendszer lehetővé teszi, hogy bármelyik pillanatban leolvassuk a pillanatnyi helyzetet a mérőléc kezdőpontjához képest, ehhez azonban a teljes hossz mentén kódolt mérőléc szükséges. Ezzel szemben a növekményes, vagyis inkrementális útmérő rendszer csak a megtett út hosszát tudja mérni, és nem képes meghatározni a tényleges pozíciót. Ezért az ilyen gépeket bekapcsolás után mindig referencia pontra kell küldeni. A leolvasó egységek működésük szerint lehetnek áteső fényesek vagy visszavert fényesek.

A számítógép legfontosabb feladatai közé tartozik a mérőprogram szervezése, a mérőgép vezérlése, a felvett pontokra geometriai elemek illesztése, elemek számítása, adatfájlok kezelése és jegyzőkönyvek létrehozása. A kalibrálások alapján folyamatosan korrekciókat végez, figyelembe véve a vezetékek, a mérőlegességek, a hőmérséklet, a tapintóelem mérete és deformációja, valamint a tapintó kilendülése alapján kapott korrekciókat is.

A koordináta mérőgépek előnye, hogy olyan mérési feladatokat is el tudnak végezni, amelyeket hagyományos vagy más módszerekkel nem lehetne.



11. ábra Az intézeti tulajdórnő portális koordináta mérőgép

Nemcsak méreteket, hanem a mért alakelemek egymáshoz viszonyított helyzetét is meghatározhatjuk, és a mérési eredmények visszacsatolása is lehetséges. Hátrányuk az alacsony mintavételezési frekvencia, ami időigényessé teszi őket, és az árak sem túl kedvező más mérési módokhoz képest.

A mérőgépen kétféle mérés végezhető: vagy az alkatrész méreteit ellenőrizzük a meglévő műszaki rajz vagy CAD modell alapján, vagy a meglévő tárgy pontjainak letapogatása alapján hozunk létre CAD modellt.

Nonkontakt szkennerek

Ezek az eszközök természetes vagy mesterséges sugárzás segítségével digitalizálják a tárgyakat, beleértve a kutatásban használt mérési eszközt is. Gyakran láthatatlan lézerefény, infravörös vagy más speciális színű fényt bocsátanak ki [99], majd a visszaverődő fényt felhasználva képeket alkotnak, vagy térbeli ponthálót hoznak létre egy tetszőleges koordináta-rendszerben. A létrehozott képek és pontfelhők kiértékelése számítógépes programokkal történik, amelyek a pontokra felülethálót illesztenek. Ennek eredményeként kis háromszögekből álló háromdimenziós modellek jönnek létre, amelyek pontosan tükrözik a beszkenelt tárgy eredeti alakját. A nonkontakt szkennerek további két altípussal rendelkeznek:

- passzív nonkontakt szkennerek, amely a már meglévő, akár külső forrásból származó sugárzások visszaverődését érzékelik. Ezeknek a külső a sugárzásoknak a forrása lehet a normál fény, infravörös fény, röntgensugárzás, mágneses rezonancia, ultrahang vagy lézer interferencia.
- aktív nonkontakt szkennerek, amelyek az általuk kibocsátott sugárzás visszaverődését vizsgálják, ezzel beavatkoznak a környezetükbe.

A passzív nonkontakt típusú megoldások esetén megkülönböztetünk három fő típust [100], a sztereokópiát, a körvonalast és a pontfelhő alkalmazásos vizsgálatot.

A sztereokópiás megoldás során két kamera segítségével készítenek olyan képet, amely hasonló az emberi agy által létrehozott képhez. Ez azt jelenti, hogy a két kamera minimálisan eltolt, egymásra illesztett képeket készít. Az eltolás miatt az agyban kialakul a mélységérzet, amely lehetővé teszi a térbeli távolságok érzékelését. A két kamerával készült minimálisan eltolt képek eltéréseiből következtetni lehet a szkennelt tárgy formájára. Ez a technika lehetővé teszi a tárgyak háromdimenziós modelljének létrehozását, amely pontosan tükrözi a tárgy eredeti alakját és méreteit.

A sztereokópiás megoldás különösen hasznos a precíziós mérések és a részletes tárgyfelismerés terén, mivel lehetővé teszi a finom részletek és a bonyolult geometriai formák pontos rögzítését [101].

A körvonalak vizsgálata során a modellalkotás folyamata úgy zajlik, hogy a tárgy körvonalairól több oldalról is felvételeket készítenek. Ezeket a felvételeket egymás mellé helyezik, így kirajzolódik a tárgy teljes alakja. Ez a módszer lehetővé teszi a tárgy külső formájának pontos rögzítését, azonban van egy jelentős hátránya: a testek konkáv részei, mint például egy váza belseje, nem vizsgálhatóak ezzel a technikával [102]. Ez azért van, mert a felvételek csak a tárgy külső felületét rögzítik, és nem tudnak behatolni a belső üregekbe vagy mélyedésekbe. Ennek ellenére a körvonalak vizsgálata hasznos lehet olyan esetekben, amikor a tárgy külső formája a legfontosabb, és a belső részletek nem kritikusak a modellalkotás szempontjából.

Pontfelhők alkalmazása során a háromdimenziós térben, amelyet x , y és z koordináták határoznak meg, olyan pontok jönnek létre, amelyek a mért tárgy felületét reprezentálják. A 3D szkennerek képesek erre, és kimenetük fájlban tárolt pontfelhő formájában jelenik meg [103]. A pontfelhő sűrűségét az eszközben található szenzor mérete határozza meg. Ezek a pontfelhők lehetővé teszik modellek, animációk létrehozását, mérések, minőségellenőrzések és akár anyagvizsgálatok végrehajtását is. Ezen kívül számos más fontos paraméter is meghatározható, például az objektum térfogata.

Általában a modellalkotáshoz konvertálásra van szükség. A konvertálás történhet háromszöges hálójú modellté, CAD modellté, valamint számos más formátumba és különböző technikákkal.

Az aktív nonkontakt szkennerek működési módszerei:

- Repülési idő (Time of flight)
- Háromszögelés (Triangulation)
- Struktúrált fény (Structured light)

Repülési idő

A repülési idő számolása az egyik legegyszerűbb 3D szkennerek technológia. A lézerimpulzus-alapú 3D szkennerek, más néven repülési idő szkennerek vagy Lidar lézeres 3D szkennerek [104], a lézer visszatérési idejét mérik.

Képesek meghatározni a távolságot a szkennerek és a tárgy között. A szkennerek 360 fokban forgatja a lézert, gyakran tükör segítségével, hogy minden irányban mérjen [105].

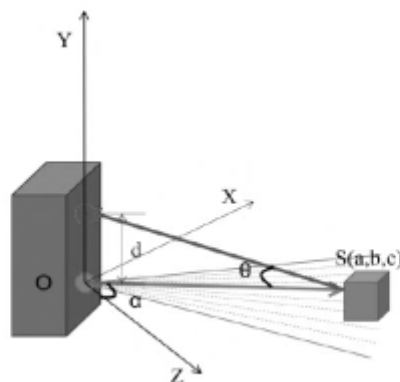
Ez a módszer azon alapul, hogy ismerjük a fény terjedési sebességét, amely közel 300.000 km/s. A szkennert kibocsát egy fényimpulzust, majd mérjük az időt (t), amíg a fény visszaverődik a tárgyról és visszaér a szkennert.

Ebből az időből kiszámítható a tárgy és a szkennert közötti távolság (s). Pontossága körülbelül 1 mm, amihez az időt pikoszekundumos nagyságrendben kell mérni. Ez nagy számítási kapacitást igényel, ami növeli a költségeket.

A repülési idő számolása alkalmas nagy objektumok, például épületek beszkennelésére is, megfelelő szakértelemmel. A mintavételezési frekvencia körülbelül 10 kHz és 100 kHz között mozog. Az alacsonyabb frekvencia oka, hogy az eszköz mozgatása és a lézert sugar helyzetének beállítása lassítja a folyamatot. A mintavételezési frekvencia növelésére gyakran használnak tükröket, amelyekkel javítható a szkennelési sebesség.

Háromszögeléses módszer

A háromszögelés (Triangulation) módszere [106] hasonló a repülési idő számításához, mivel itt is lézert sugarat vetítünk a tárgyra (12. ábra). Azonban ebben az esetben nem a visszaverődő sugar beérkezési ideje határozza meg a tárgy és a mérőeszköz közötti távolságot, hanem egy külső kamera. Ahhoz, hogy a lézerpont valós térbeli helyzetét meghatározzuk, ismernünk kell a mérőberendezés és a kamera egymáshoz viszonyított helyzetét, azaz a távolságukat és az optikai tengelyeik által bezárt szöget. (θ)



12. ábra A háromszögelés számítása koordináta rendszerben [106]

A háromszögelés működését leíró számolási eljárásához meg kell határoznunk egy koordináta rendszert $\{O\text{-}XYZ\}$, így kiszámolható az S pont helyzete a koordináta- rendszerben:

$$x_a = \rho \sin \alpha \quad (1)$$

$$y_a = v t \quad (2)$$

$$z_a = \rho \cos \alpha \quad (3)$$

ahol α a vetített lézer sugár középtengelye és a koordináta rendszer Z tengelye által bezárt szög. Az Y irányú mozgási sebesség jele v , mértékegysége [m/s], továbbá a t változó a mozgási idő másodpercben. A mért tárgy felülete és a szkennert közötti távolság a következőképpen számolható:

$$\rho = \frac{d}{\tan \theta} \quad (4)$$

ahol θ a vetített sugár és a visszavert sugár közötti szög. A d -vel jelölt paraméter a lézerfény kibocsátási helye és a visszavert sugarakat érzékelő kamera közötti távolság [107].

Így már meghatározható az S pont bármely koordinátája:

$$x_a = \frac{d \sin \alpha}{\tan \theta} \quad (5)$$

$$y_a = v t \quad (6)$$

$$z_a = \frac{d \cos \alpha}{\tan \theta} \quad (7)$$

Az így kapott rendszer a tárgy előre meghatározott mozgásával a tárgy tetszőleges pontja szkennelhetővé válik. Az előző módszernél a távolságok és a tárgy mérete nem volt olyan lényeges, ennél a módszernél viszont a mérési távolság és méret korlátolt. Az előnye viszont a másikkal szemben, hogy a mérési pontossága akár 10 μm is lehet [107].

A rövid hatótávolságú lézerszkennerek háromszögelési módszert alkalmaznak, amely lehetővé teszi egy 3D objektum alakjának rögzítését és leírását pontfelhő formájában. A lézersugarat a tárgy felületére irányítják, majd a visszaverődő sugár az optikai érzékelőbe jut. A visszaverődött sugár alapján a háromszögelési algoritmus meghatározza a fény visszaverődési szögét, amely a szkennert és a vizsgált felület távolságától függ. Miután elegendő adat gyűlt össze, a szkennert képes létrehozni a szkennelt objektum felületi térképét.

A pontos letapogatáshoz elengedhetetlen az érzékelő és a lézersugárforrás közötti távolság ismerete és pontos meghatározása.

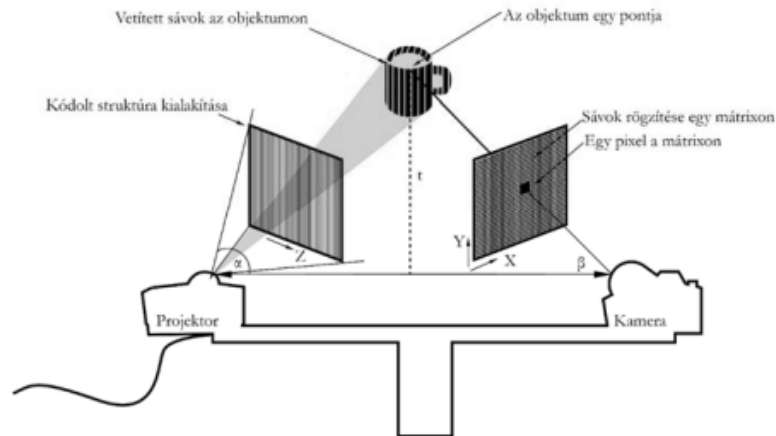
A rövid hatótávolságú lézerszkennerek előnyei közé tartozik a nagy pontosság, a kiváló felbontás, a hordozhatóság és az alacsony érzékenység a változó fényviszonyokra, szemben például a fotogrammetriai módszerekkel. Azonban ezek a szkennerek nem túl hatékonyak átlátszó vagy fényes felületek esetében, ezért ezeket a felületeket előzetesen kezelni kell a szkennelés előtt.

2.3.2 Strukturált fény módszer

A lényegi különbség az, hogy ebben az esetben több pont helyzetét vizsgáljuk egyszerre, úgy, hogy nem pontot vetítünk a mérendő tárgyra, hanem 1 vagy 2 dimenziós négyzethálót. A kivetített négyzetháló a tárgy felszínére érkezve vetítve torzul, ebből lehet megállapítani a tárgy felszínének geometriáját. Ennek a módszernek az előnye, hogy a kamera képén látható teljes felület szkennelése lehetséges, ezáltal akár mozgó tárgyak valós időben való szkennelése is megvalósítható a segítségével [108]. A strukturált fény technológiának egy bonyolultabb számítást igénylő formái léteznek (13. ábra). A vetített csíkok színes vonalak. A vonalak színeinek megválasztásakor fontos ügyelni arra, hogy az egymással érintkező vonalak színárnyalatai a lehető legnagyobb mértékben eltérjenek egymástól a jó megkülönböztethetőség miatt. A szkennelés felbontását hátrányosan befolyásolja, ha a tárgy felülete fényes, csillogó vagy átlátszó. Ilyen szkennelés esetén a kapott eredmény zajos, a pontatlanság valószínűsége növekszik. hátrányosan befolyásolja, ha a tárgy felülete fényes, csillogó vagy átlátszó. Ilyen szkennelés esetén a kapott eredmény zajos, a pontatlanság valószínűsége növekszik.

A következő lehetőség, hogy időben változó szélességű csíkokat (rácsokat) alkalmazunk a megkülönböztethetőségért. Ezt a megoldást kódolt fénymintának nevezik. A csíkok mintája lehet például egyenletesen mozgó szinuszos [109].

A strukturált fényt kibocsátó szkennerek kék vagy fehér LED fényt használnak, amelyet LCD vagy DLP projektor bocsát ki [110]. Ezek a szkennerek lineáris fénymodellt vetítenek a tárgyra, amelynek alakját egy vagy két kamera érzékeli a modell deformációja alapján.



13. ábra A strukturált fény módszer bemutatása [110]

A szoftver képes megkülönböztetni az egyes vonalak éleit a modellben, és háromszögelés segítségével meghatározza a vizsgált felületek távolságát a szkennertől, valamint a tárgy alakját.

Két kamerás rendszerek esetén egy szkennelés során két kép készül, ami lehetővé teszi egy 3D kép létrehozását egyetlen felvételtől. Ezeket a szkennereket nagy felbontás és gyors szkennelési sebesség jellemzi, amely lehetővé teszi egy szkennelés végrehajtását 2 másodpercen belül. A lézeres szkennerekkel ellentétben a strukturált fényalapú szkennerek biztonságosak a látás szempontjából. Azonban összetett geometriájú objektumok esetén hátrányba kerülnek, mivel a teljes átvizsgáláshoz különböző szögekből kell szkennelni. Ezenkívül érzékenyek a környezeti fényre, így nem alkalmasak terepi használatra. A kék fényt kibocsátó projektorok részben csökkenthetik ezt az érzékenységet.

HP Strukturált szkennerek, kutatáshoz használt eszköz

Az általam használt **HP 3D Structured Light Scanner 5 Pro** típusú szkennerek [111] is ebbe a csoportba tartozik, tehát a tárgyra vetített vonalhálózat torzítását és a visszavert fény intenzitását is méri, ami illesztéshez elegendő (akár 10 mikron) eredményeket biztosít (14. ábra).

Hasonlóan működnek, mint a lézerek, de a fényforrás egy nagy felbontású projektor, amely raszteres rácsot vetít az objektum felületére.

A gyári eszköz csomag tartalmaz egy állványt, egy vezetősínt, egy kamerát és egy projektort.



14. ábra A HP strukturált fény szkennelőkészlet [111]

További tartozék még a forgatótányér, a kalibrációs tálcák és a szkennelés folyamata alatt használandó szoftver kulcs (pendrive) is.

A teszt során a következő szoftver- és hardverelemek voltak:

- 3D szkennelés: HP 3D Structured Light Scanner 5 Pro Edition szkennelőkészlet (optimális beállítások esetén 0,05 mm pontosság) szoftverrel (verzió: 5.2.0.790), HP Development Company, L.P., Németország
- CAD modellek: Solid Edge Academic Edition (verzió: 221.00.00.114) és Meshlab (fpv2020.12),
- Algoritmus környezet: Python (verzió: 3.7.7) Open3D (verzió: 21.1.3) és OpenCV megjelenítési mezővel.

Pontfelhő generálása HP 3D szkennelőkészlet gyári szoftverének támogatással

A 3D szkennelőkészlet gondos megismerése és az eszköz részletes beállítása elengedhetetlen a pontfelhők későbbi pontos illesztéséhez. Ha a beállítási paraméterek optimálisak (ebben a gyári HP szoftver segít [112]), akkor elkezdheti a szkennelést:

A munkadarab szkennelése az érvényesítő készlethez a következő lépésekből áll:

1. Kamera szögének beállítása (10-15 fok) a vezetősínhez mérve;
2. A projektor és a kamera fókuszának élességének beállítása;
3. Tálcák kalibrálása a munkadarab méretének megfelelően. A vetítési rácsot a projektor a tálcák felületére vetíti, majd a háttér egyéb részleteit (forgatóasztal) szkenneli.

4. A hibátlan munkadarabot a tálca közepére helyezni (a munkadarab méretétől függően itt 100 cm), beállítja az elforgatási szöveget, és megkezdődik a szkennelési folyamat. Az általában hat vagy hét képből összeolvasztott háromdimenziós modell hálómodellként exportálható különféle (. stl/.obj) formátumban.
5. Mivel a beolvasott fájl jelenleg 3D pontokból és háromszögekből (úgynevezett felületekből) álló hálómodell, a modellekből pontfelhőt hozunk létre, amelyet kísérleti alanyként (adatforrásként) használunk a vizsgálathoz.
6. A folyamatot megismételjük a hegesztési hibát tartalmazó munkadarabbal, az ajánlott beállítással.

2.3.3 Pontfelhők egymásra illesztése minőségellenőrzésként

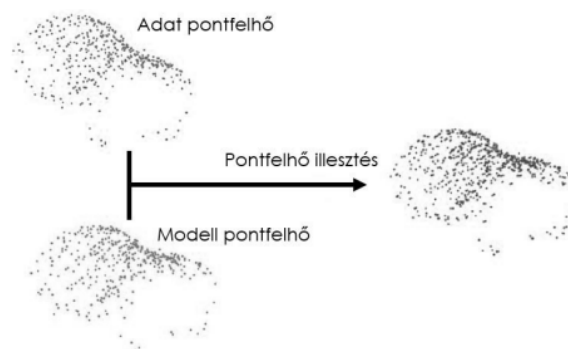
A bemeneteink minden esetben pontfelhők és ezek jellemzően párban kerülnek utófeldolgozásra. Feltételezzük, hogy két objektum nagyjából azonos, de a hegesztési hibák miatt különbségek vannak az ideális és a pontfelhő között a hegesztési területen. A méreteiket tekintve annál előnyösebb minél inkább hasonlóak.

Így a pontfelhőket mielőtt algoritmusokkal támogatni tudnánk, bizonyos előkészületeket is igényelnek, ilyen a mintavételezés folyamata, a hatékonyabb adatfeldolgozás érdekében.

Ezután a két pontfelhőt egy durva jellemző alapú regisztrációval kívánjuk később egyeztetni. A pontfelhők regisztrációja azt jelenti, hogy a két pontfelhőt egy közös koordináta-rendszerbe helyezzük, hogy összehasonlíthatóak legyenek.

Pont leíró algoritmusok, FPFH

Ehhez a pontjellemező-leíróknak ki kell számítaniuk a pontokat mindkét felhőben.



15. ábra Az FPFH működése

A pontleíró egy nagy dimenziójú vektor, amely információkat tartalmaz, és leírja a lekérdezési pont alatti felületet. Ez a vektor tartalmazza azokat az adatokat, amelyek alapján a pontokat össze lehet hasonlítani és egyeztetni (15. ábra).

Számos funkcióleíró algoritmus létezik, amelyek különböző módszerekkel számolják ki ezeket a vektorokat. A kutatásomban használt FPFH (Fast Point Feature Histograms) is egy ilyen algoritmus. Az FPFH hatékonyan tud számolni, és jó párosítási pontosságot biztosít. Az FPFH a PFH-n (Point Feature Histograms) alapul, amely egy korábbi és kissé eltérő verzió volt, nagyobb számítási összetettséggel és dimenzióval.

Az FPFH algoritmus előnye, hogy gyors és pontos, így ideális választás a pontfelhők regisztrációjához, különösen akkor, ha hegesztési hibák miatt különbségek vannak az objektumok között.

Az egyik lehetséges megoldás a pontfelhők feldolgozására a gyors globális regisztráció (FGR) és az iteratív legközelebbi pont (ICP) algoritmus, amely páros megfeleltetéseket hoz létre két pontfelhő között [113]. A pontfelhők illesztése után a távolságok kiszámíthatók, és az eltérés sűrűség alapú klaszterezéssel azonosítható [114]. A sűrűség alapú térbeli klaszterezés zajjal (DBSCAN) a sűrűség alapú klaszterezési technikák úttörője [113].

Tetszőleges alakú klasztereket képes felfedezni, és hatékonyan kezeli a zajt vagy a kiugró értékeket. A DBSCAN algoritmus időbonyolultsága az adathalmaz méretével négyzetes, és nagy adathalmazokra is kiterjeszhető [115].

A következőkben ismertetem a pontfelhő illesztésre használt algoritmusokat, amelyek később ipari megközelítésből felhasználásra kerülnek a kutatásom során.

A gyors globális regisztráció (FGR) és az iteratív legközelebbi pont (ICP) algoritmusok, segítenek a pontfelhők összehasonlításában és a hibák azonosításában.

FGR, ICP és DBSCAN

A Fast Global Registration algoritmus gyors és hatékony módszert kínál a pontfelhők globális illesztésére, míg az Iterative Closest Point algoritmus iteratív módon finomítja az illesztést, hogy a lehető legpontosabb eredményt érje el. Ezek az algoritmusok együttműködve biztosítják, hogy a pontfelhők közötti eltérések pontosan és megbízhatóan azonosíthatók legyenek [116].

A kutatás során alkalmazott módszerek közé tartozik továbbá a DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) sűrűség alapon történő klaszterezés, amely egy hatékony algoritmus a pontfelhők közötti eltérések azonosítására [117].

A DBSCAN lehetővé teszi a különböző formájú klaszterek azonosítását, és képes kezelni az adatokban lévő zajos mintákat azáltal, hogy az alacsony sűrűségű régiókban lévő pontokat zajnak minősíti és kihagyja őket. Működése a térbeli sűrűségen alapul, ami számos előnnyel jár más klasszikus klaszterező algoritmusokkal szemben. Az egyik ilyen előnye, hogy képes azonosítani a tetszőleges alakú klaszterek helyes azonosítására. Egy másik előnye, hogy osztott klaszterezést végez, tehát a klaszterek számának automatikus meghatározásával számol, így nem szükséges előre meghatározni a klaszterek számát [118].

A DBSCAN algoritmus segítségével az eltérések számszerűsíthetők és a szabványos hegesztési hibakategóriák szerint osztályozhatók például az ISO 5817:2014 szabvány alapján. Ez a folyamat lehetővé teszi a hegesztési hibák pontos azonosítását és csoportosítását, ami elengedhetetlen a hegesztési folyamatok minőségellenőrzéséhez.

Az említett szabvány részletes iránymutatásokat nyújt a hegesztési hibák osztályozására és értékelésére, biztosítva, hogy a hegesztési folyamatok minőségellenőrzése megfeleljen a legmagasabb ipari szabványoknak [117].

Az azonosított hibák kategorizálása segít meghatározni, hogy a hegesztett kötés megfelel-e a minőségi követelményeknek, vagy további beavatkozásra van szükség.

Ez a megközelítés nemcsak a hegesztési folyamatok minőségellenőrzését javítja, hanem hozzájárul az autonóm gyártási rendszerek fejlesztéséhez is. Az autonóm gyártási rendszerek célja, hogy minimális emberi beavatkozással működjenek, és a DBSCAN algoritmus által nyújtott pontos hibafelismerés és osztályozás lehetővé teszi a rendszerek számára, hogy valós időben reagáljanak a gyártási folyamat során felmerülő problémákra.

Ezáltal növelhető a gyártási folyamatok hatékonysága és megbízhatósága, ami végső soron hozzájárul a termékek minőségének javításához és a gyártási költségek csökkentéséhez.

A hegesztési folyamatok minőségellenőrzése kulcsfontosságú az autonóm gyártás eléréséhez. A 3D szkener által gyűjtött adatok felhasználásával a hegesztési hibák hatékonyan azonosíthatók és csoportosíthatók, ami hozzájárulhat a gyártási folyamatok hatékonyságának növeléséhez és a minőségbiztosítás javításához.

Ez a megközelítés lehetővé teszi a hegesztési hibák gyors és pontos felismerését, ami elengedhetetlen a magas minőségű termékek előállításához.

Additív gyártás

A vizsgálat alkatrészek szemléltetéséhez, hibáinak kijavításához, újra tervezéséhez kapcsolódik a kutatásom egy rövid része, így ehhez kötődően az additív gyártás technológiai folyamata is. Az additív gyártás, mint technológia, más néven 3D nyomtatási technológia, rétegről rétegre építi fel a tárgyakat digitális modellek alapján. Ez az eljárás lehetővé teszi a bonyolult geometriai formák megalkotását, amelyeket hagyományos gyártási technológiákat követve körülményes vagy lehetetlen lenne előállítani [119].

Az additív gyártás során felmerülő kihívások közé tartozik a tervezési rugalmasság, az anyaghatékonyság és az életképes kis volumenű gyártás biztosítása [120]. Az anyagok és technológiák közötti kompatibilitás, a nyomtatási folyamatok stabilitása és a végtermékek minősége mind olyan tényezők, amelyek befolyásolják az additív gyártás sikerességét.

Az anyag-extrudálási technológiák egyre népszerűbbek a 3D nyomtatás területén, és számos iparágban alkalmazzák őket.

A material extrusion (anyagextrudálás) az additív gyártás egyik legelterjedtebb módszere. Ebben a folyamatban az anyagot egy fűtött fűvókán keresztül extrudálják, és rétegről rétegre építik fel a tárgyat. Az anyagextrudálás leggyakrabban műanyagokkal történik, de fémek és kerámiák is használhatók. Az extrudált anyagok keveréke általában polimer kötőanyagot és finom szemcsés fém vagy kerámia port tartalmaz.

A material extrusion folyamatának lépései a következők:

1. **Nyomtatás:** A folyamat a nyomtatással kezdődik, ahol a fémport tartalmazó filamentet rétegről rétegre építik fel. Ezeket a nyomtatott részeket "zöld" részeknek nevezik.
2. **Kötőanyag eltávolítása:** A zöld részeket egy kötőanyag eltávolító állomásra helyezik, ahol egy szerves oldószer feloldja a műanyag kötőanyagot, és a zöld részek "barna" részekké alakulnak.
3. **Sinterelés:** A barna részeket egy sinterelő kemencébe helyezik, ahol az anyag specifikus profilja szerint égetik el a maradék kötőanyagot, és a fémport összeolvasztják, hogy teljesen sűrű, kész fém részeket hozzanak létre

2.3.4 Szimulációs környezet használata eredményorientáltan

Kutatási tevékenységem célja, hogy kitöltse azokat a kutatási hiányosságokat és réseket, amelyeket a hegesztési varratok vizsgálatának tanulmányozása során megtapasztaltam a 2D és 3D technológiás alkalmazások használatához kapcsolódóan.

Kulcsfontosságú terület a prediktív karbantartás támogatása, amelyben a rendszer előre jelzi a lehetséges meghibásodásokat, és megelőző intézkedéseket javasol a varratvizsgálatok területén is. Ez jelentősen csökkenti az állásidő és a karbantartási költségek kockázatát. A korábbi módszerek gyakran reaktívak és csak akkor észlelik a meghibásodásokat, amikor azok már bekövetkeztek, ami növeli az állásidő és a karbantartási költségek kockázatát [121].

A képkalkuló technológiák által nyújtott eredménytermékek a számítógépes szimuláció képességével integrálva, olyan technológiai támogatást nyújt, amely jobban megérti a gyártósori környezetek dinamikáját [122]. A gyártósori rendszerek összetettsége, olyan bizonytalan problémák elemeit tartalmazza, amelyek így már nem oldhatóak meg a szokásos matematikai modellekkel [123].

Egy jól felépített szimulációs környezet lehetővé teszi a termékek keletkezésének lépéseit, a gyártási folyamatok vagy rendszerek összehangoltságát [122].

Becslések, szimulációk futtatása

A szimulációs technológiák hatékonyságukat már számos gyakorlati probléma megoldásában bebizonyították a feldolgozóiparban. A szimulációt úgy határozzák meg, mint egy rendszer vagy valós folyamat működésének utánezatát.

Ez magában foglalja egy rendszer mesterséges történetének létrehozását és megfigyelését, hogy következtetéseket vonhassunk le a valóság ábrázolásának működési jellemzőiről. A szimulációs modellezés olyan módszer, amely valós vagy elképzelt rendszermodelleket vagy folyamatmodelleket használ. Segít a modellezett rendszer jobb becslésében és megértésében a viselkedéselemzésen keresztül.

A modellezés lehetővé teszi az összetett rendszerek megértését és a komplex, sokoldalú termékek fejlesztését, valamint új koncepciók vagy rendszerek, erőforrás-politikák és valós megvalósítások előkészítését anélkül, hogy zavarná a ténylegesen működő rendszert. A valós rendszer legmegfelelőbb szimulációs modelljének kiválasztása és kidolgozása többparaméteres döntést igényel.

Például statikus modelleket használnak tevékenység nélküli struktúrák modellezésére, míg dinamikus modelleket egy időben fejlődő rendszer viselkedésének vizsgálatára [124].

A szimuláció fontos szerepet játszik mind a tervezési értékelésben (úgynevezett offline), mind a működési folyamat teljesítményének értékelésében (online) a gyártási rendszer során [125]. Gyakran használják hosszú távú döntések meghozatalához a tervezési folyamatban, például a létesítmények elrendezésében, a rendszerkapacitás-konfigurációkban, az anyagmozgató rendszerekben, a rugalmas gyártási rendszerekben és a cellás gyártórendszerekben.

Az offline szimulációs futásidőnek nincs jelentősége a szimulációs folyamatban, de lehetőséget nyújt a "mi lenne, ha" forgatókönyvek tanulmányozására és elemzésére. Ez akkor lehetséges, ha a szükséges számítási kapacitást elérjük. Az online valós idejű szimuláció ezzel szemben ezredmásodpercek alatt képes elemezni a felhasználó és a rendszer viselkedését, lehetővé téve a felhasználó számára, hogy virtuálisan prototípust fejlesszen ki és állítson elő a termék vagy szolgáltatás számára.

A valós idejű szimuláció során a számítógép ugyanolyan sebességgel fut, mint a fizikai rendszer, ezért a szimulációs modellt valós idejű adatokkal kell ellátni, amelyek IoT segítségével érhetőek el. Egy gyártó üzem nagy pontosságú szimulációját Virtual Factory (VF) néven ismerjük [126]. Ez egy ipari együttműködési környezet, amely a gyár virtuális valóság (VR) ábrázolására összpontosít, vagy egy emulációs lehetőség VF-nek tekinthető. A VF koncepció valós gyári szimulációs modelleket validál az adatok generálására és valós körülmények között történő munkavégzésre. Az új szimulációs modellezési paradigma ezen a koncepción alapul, és Digital Twin (DT) néven ismert [127]. Az ultranagy felbontású szimuláció a DT koncepció alapján fontos szerepet játszik az I4.0-ban.

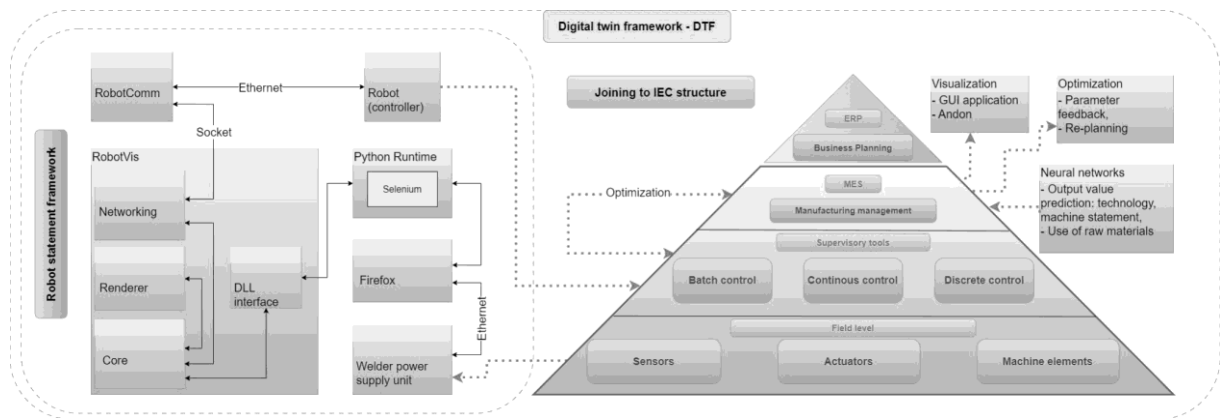
A szimuláció kiterjed a termék életciklusának összes fázisára, kombinálva a valós adatokat a szimulációs modellekkel a jobb teljesítmény érdekében, reális adatokon alapuló termelési hatékonyság és karbantartás.

A szimuláción alapuló technológiák tehát központi szerepet töltenek be a digitális gyári megközelítésben, amely lehetővé teszi a kísérleteket és az eltérések validálását a gyártási rendszerminták, folyamatok és termékek terén.

Korábbi tanulmányunkban [128] kifejlesztettünk egy keretrendszert, amely a hegesztési minták létrehozásához használt paramétereket .csv fájlokban gyűjti össze.

Emellett valós időben képes megjeleníteni a gyártásban lévő munkadarab hegesztési adatait és vizualizálni a robot mozgását. A robotcella-vezérlő interfésze az ERP-MES alapú szerkezeti logikán alapult [129].

A kapcsolat létrehozásához két kis alkalmazás - RobotComm és RobotVis - összekapcsolása került kifejlesztésre, amelyek integrálhatók az IEC 62264 rendszerstruktúrába [130] ahogy az 16. ábra is mutatja.



16. ábra Informatikai komponensek integrálása az automatizálási struktúrába [130]

Az ábrán látható módon az alkalmazások már az automatizálási piramis legalsó szintjén gyűjtenek adatokat, és támogatják a felsőbb szintek döntéshozatalát azáltal, hogy visszacsatolást nyújtanak a felügyelői szintre. A robotcella vezérlője és a hegesztőgép szabványos Ethernet és TCP/IP protokollokon keresztül kommunikál.

A dolgozat következő részeiben kutatási módszerek kerülnek bemutatásra, amelyek hozzájárulhatnak a hegesztési varratok vizsgálati területének bővítéséhez. A minőség-ellenőrzés során keletkezett eredményeket visszajelzésként használjuk fel a gyártási folyamat során keletkező események katalógusának bővítésére és adatok becslésére.

A hegesztési varratokat egy hattengelyes hegesztőrobot készíti és a valós robottal párhuzamosan egy szimulátor robot [131] is dolgozik szimulálva a valós robot mozgását, valamint a hegesztés során használt hegesztési paramétereket rögzíti. A digitális ikeralkalmazásokat egyre gyakrabban használják a hegesztés korszerű optimalizálására [132].

A hegesztési folyamat paramétereinek optimalizálására mutatok be példákat, ahol digitális iker előkészítéseként szimulációs folyamatokat alkalmazok.

A digitális ikertámogató adatokkal előállított információs csomagot gyűjtési keretrendszer megkönnyíti a hegesztések megértéséhez való szorosabb kapcsolódást, amely jelenleg a pontfelhő jellemzőire hivatkozva, valamint a képfelismerő és élszűrési (Sobel, Prewitt és Canny) algoritmusok [135] által kinyert varratszélességi adatokra támaszkodva, a hiányzó adatokra becsült értékeket javasol.

Egyrészt pontfelhőket generálnak a kiválasztott hegesztett alkatrészekből, amelyeket az illesztéshez használnak, másrészt pedig másrészt felülnézeti fényképeket készítenek a képfelismerő algoritmusok számára a varratszélesség meghatározásához.

Így a hegesztési felületminőségi eredményeket egy információs csomaggal integrálja, így a virtuális robot által gyűjtött adatokra támaszkodva, a hegesztési tulajdonságok becsülhetőek [133], egy digitális ikert előkészítő szimulációs alkalmazással [134].

3. Kutatási módszertan

3.1 Kutatási terv

1. Céлом annak igazolása, hogy CAD alapú pontfelhők illesztése során, a hegesztési hibák kimutathatók elvi szinten:
 - A pontfelhők illesztésére PFH analízis után gyors globális regisztrációs (FGR) és iteratív legközelebbi pont (ICP) algoritmusok használatával.
 - A hegesztési hibák azonosítására és osztályozása hegesztési szabványokhoz kapcsolódóan.
2. Céлом eltérések eredményorientált kimutatása, valódi alkatrészek 3D pontfelhőinek illesztése esetén:
 - A pontfelhők illesztésére globális regisztrációs (FGR) és iteratív legközelebbi pont (ICP) algoritmusokat használatával.
 - Sűrűség alapú klaszterezés (DBSCAN) alkalmazása, a pontfelhők összehasonlítására és az eltérések meghatározására. A 3D szkener által gyűjtött adatok alapján a hegesztési hibák azonosítása és osztályozása a hegesztési szabványokhoz kapcsolódóan.
3. Céлом az FDM nyomtatott termékek utólagos hőkezelésének utólagos vizsgálata:
 - A termikus utófeldolgozási módszerével, ahol az alkatrészeket a 3D nyomtatón hőkezelésnek vetik alá, növelve a mechanikai ellenállásukat.
4. Céлом szimulációs módszerek alkalmazása becslés eléréséhez, varratszélesség értékeihez kapcsolódóan:
 - A kutatás során egy keretrendszert használtam fel, amely a hegesztési robot mozgásának és hegesztési paramétereinek valós idejű monitorozását valósítja meg, amely a hegesztési robot és a hegesztőgép adatainak rögzítésére és vizualizálására szolgál. Az adatokat, amit a virtuális robot segítségével gyűjtöttem, integráltam a hegesztési varratokról készült pontfelhők vizuális kiértékeléséhez.
 - Az élészlelési algoritmusok alkalmazása során különböző szűrőket és éldetektorokat használtam a visszacsatolás elősegítéseként, mint például a Sobel, Prewitt és Canny algoritmusokat, így a varratszélességek bemenetet tudnak képezni becsléshez Machine Learning szimulációknál.

3.2 Adatgyűjtés és elemzés 3D pontfelhők illesztése esetén

A kutatásom során a korábban leírtak szerint több módszert és eszközt alkalmaztam a hegesztési hibák minősítésére. Az alábbiakban részletezem a kísérleti terv részleteit és a kapcsolódó tudományos módszereket, amelyek a 3D pontfelhők generálásához kapcsolódnak.

Pontfelhők generálás, adatgyűjtés 3D szkenneléssel

CAD alapú modellezés esetén a kezdeti lépések közel azonosak, mint a 3D szkenneléstől generált pontfelhők egymásra illesztése esetén.

1. **Pontfelhők generálása:** A hegesztett mintákat és a referencia alkatrészeket 3D szkenneléssel szkenneltem be és pontfelhőket hoztam létre. A szkennelési folyamat során a tárgy felületére vetített rács torzulását és intenzitását mérik, hogy létrehozzuk a digitális modellt. A pontfelhők összehasonlításához szükség volt a pontok jellemzőinek meghatározására is. CAD-alapú modellezés esetén a pontfelhők 3D szoftverrel kerülnek létrehozásra.
2. **Pontfelhők illesztése:** Az FGR és ICP algoritmus segítségével illesztették a pontfelhőket. Az algoritmus iteratív módon finomította az illesztést, hogy a pontfelhők jobban illeszkedjenek egymáshoz. Az ICP algoritmus segítségével a pontfelhők pontosan illeszthetők egymáshoz, ami lehetővé teszi a hegesztési hibák pontos azonosítását. későbbi szabványhoz igazítását.
3. **Klaszterezés:** A DBSCAN algoritmust használva a pontfelhők közötti eltérések kerültek klaszterezésére. Az algoritmus azonosította a sűrűség-alapú klasztereket, majd a klaszterek a hegesztési hibák kategóriái szerint kerültek osztályozásra. A DBSCAN algoritmus előnye, hogy nem szükséges előre meghatározni a klaszterek számát, mivel az algoritmus automatikusan felismeri a klasztereket a sűrűség alapján.
4. **Értékelés:** Az eredményeket az ISO 5817:2014 szabvány alapján hatékonyan képes azonosítani és csoportosítani a hegesztési hibákat. Az ISO 5817:2014 szabvány három minőségi kategóriát tartalmaz, és meghatározza a hibák elfogadhatóságát. Ez a módszertan lehetővé tette a hegesztési hibák pontos és gyors azonosítását, valamint a hegesztési folyamatok termelékenységének javítását.

3.2.1 Pontfelhők mint benetek

Az összehasonlításhoz a Python környezetében (verzió 3.7.7) használt algoritmust használtam az Open3D (verzió 21.1.3) vizualizációs felülettel [136]. Az algoritmus a pontfelhők közötti eltérések meghatározására és azok közötti korrelációk leírására szolgál. Bemenetként a tényleges munkadarabokat szkenneljük (3D-s strukturált fényszkenner) vagy modellezzük CAD felhőkkel. A kapott nagy sűrűségű pontfelhőt ezután hálós 3D-s modellé alakítottam át.

CAD verzió esetén a sarokhegesztett modellek CAD modelljei készültek, amelyek az ISO 5817:2014 szabványban leírt eltéréseket tartalmazzák. Ezeket a nem-megfelelőségeket három minőségi kategóriába sorolták, mindegyikhez meghatározott határértékeket. Vagyis a rendszer kezdetben CAD modellekkel lett betanítva, így ezeket a hibás pontfelhőket egyenként hasonlítjuk össze a jó CAD modell hibamentes pontfelhőjével. Az elemzés célja az volt, hogy a pontfelhő-összehasonlításból megkapjuk az egyes hibákhoz kapcsolódó eltéréseket, és feltárjuk ezek összefüggéseit.

Bemeneti pontfelhők méretének egységesítése, mintavételezéssel történik meg. A mintavétel viszonylag kis számú reprezentatív elem vagy részfelhő szisztematikus kiválasztása. A mintavétel folyamata után a pontfelhők (8. és 9. egyenlet) a következőképpen [137] alakulnak:

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\} \quad (8)$$

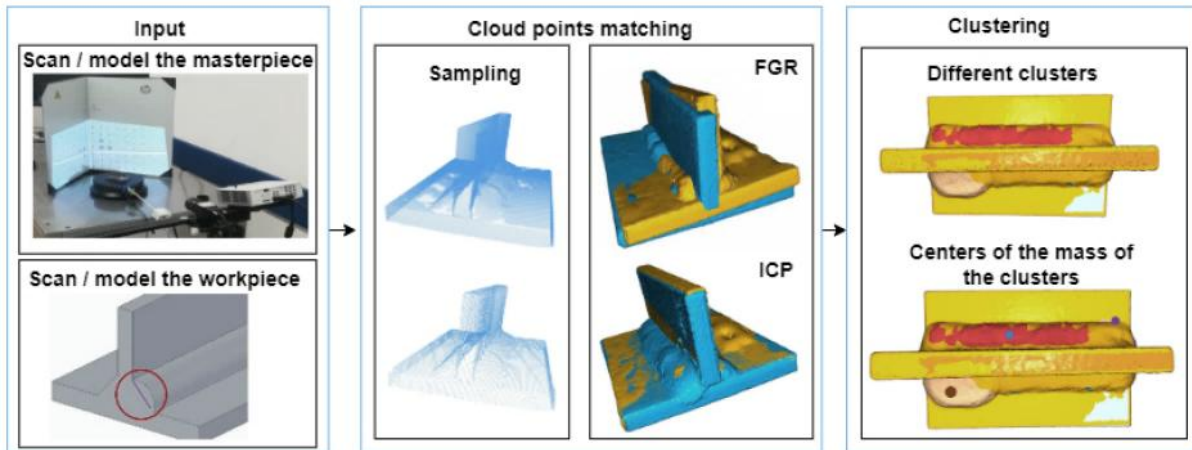
$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N\} \quad (9)$$

ugyanannyi (N) pontból állnak, amelyek a megfelelő illesztéshez szükségesek.

Pontjellemező Hisztogram (PFH)

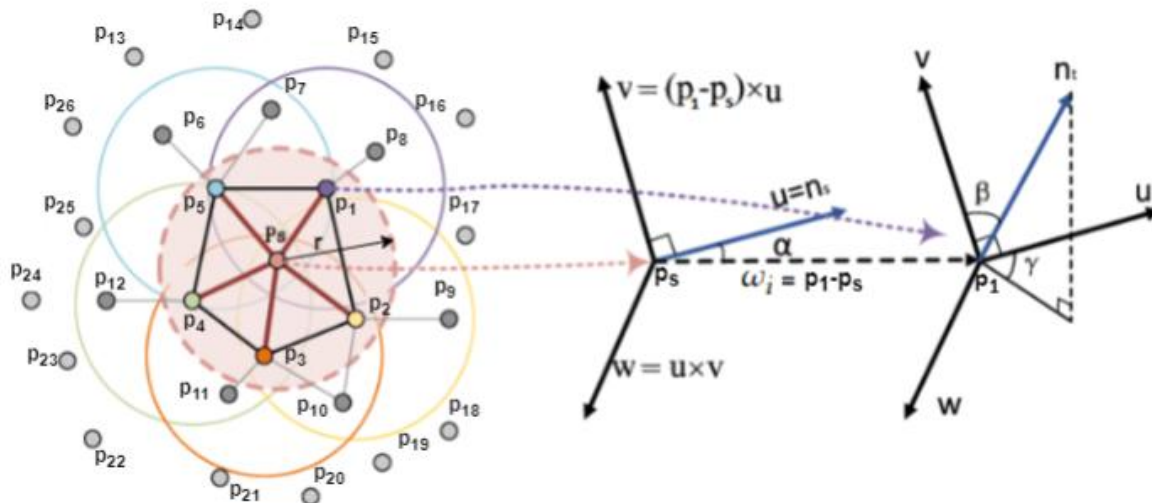
A PFH elemzés során a pontok eloszlását és helyzetét vizsgáltam [138]. A hisztogram a pontok közötti távolságokat és a változók eloszlását ábrázolja. A PFH lehetővé teszi a pontfelhők közötti eltérések pontos elemzését és azonosítását.

A javasolt CAD-modell alapú hibaeloszlások létrehozási és elemzési módszere az egymásra illesztés és a PFH analízis kombinációján alapul, hogy kimutassa a jellemző hibák (geometriai eltérések, varrat konvexitása, gyökérméret változás, szélkiégés, zárványok, végkráter, repedések) minőségi eltéréseit. A keretrendszer pontfelhők létrehozásával kezdődik valódi alkatrészek esetében is. Az adatok feldolgozása (17. ábra), a bemenetek létrehozásának kivételével tehát hasonló.



17. ábra A hibakereső analízis lépései

A következő lépésben a pontjellemezők leírói (gyors pont jellemzők hisztogramja – FPFH) [27] kiszámításra kerülnek \mathbf{P} -ben és \mathbf{Q} -ban (lásd a 3. ábrát). A lekérdezés szerint \mathbf{p}_s és \mathbf{p}_i valamint \mathbf{q}_s és \mathbf{q}_i szomszédok [137]. A pontleírók kiszámítása után a pontmegfelelések a legközelebbi szomszéd jellemző illesztésével állapíthatók meg. Az FGR több teszttel szűri az eredményeket (megfelelés elutasítása), hogy kizárja a hamis megfeleléseket. Ezután megbecsül egy transzformációt a két felhő összehangolásához a fennmaradó megfelelések felhasználásával. Ez a transzformáció a kezdeti transzformáció a következő lépéshez (további transzformáció finomítása ICP-vel). A lekérdezési pont \mathbf{p}_s és a szomszédjai $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4, \mathbf{p}_5$ környezete hasonló, így a, a szögjellemezőket minden fekete vonallal összekapcsolt pontpárra ugyanúgy számítjuk (18. ábra).



18. ábra FPFH számítása

Feltételezhető, hogy a két objektum nagyjából azonos, de a hegesztési hibák miatt különbségek vannak az ideális és a vizsgált pontfelhő között. Ezért először egy durva jellemző regisztrációval (Fast Global Registration) egyeztetem a két pontfelhőt. Ehhez minden pontban ki kell számítani a pontjellemező-leírókat mindkét felhőben. A pontleíró egy nagy dimenziójú vektor, amely leírja a lekérdezési pont alatti felületet. Számos funkcióleíró algoritmus létezik. Az FGR folyamatát követve az FPFH-t alkalmazhatjuk. Az FPFH hatékonyan számol, és jó párosítási pontosságot biztosít. Az FPFH a PFH-n alapul, amely egy korábbi és kissé eltérő verzió volt, nagyobb számítási összetettséggel és dimenzióval. Az összefüggések a pontpárok ($\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_t$) normálvektorai között [137], a különböző szögjellemezők (α, β, γ) alapján számolhatóak ki (10. egyenlet).

Egy pontpárhoz ($\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_s$) először meg kell határozni (11. egyenlet) egy fix koordináta keretet ($\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$), a szögjellemezők kiszámítása (12. egyenlet) pedig a következőképpen: $\mathbf{u} = \mathbf{n}_s$, $\mathbf{v} = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_s) \times \mathbf{u}$, $\mathbf{w} = \mathbf{u} \times \mathbf{v}$ alakul. A három szögjellemező így már kiszámítható a következők szerint egy pontpárra:

$$\alpha = \mathbf{v} \times \mathbf{n}_s \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s\|} \times \mathbf{u} \quad (11)$$

$$\gamma = \arctan(\mathbf{t} \times \mathbf{n}_t, \mathbf{u} \times \mathbf{n}_s) \quad (12)$$

\mathcal{N}_{p_s} pedig (13. egyenlet) a \mathbf{p}_s lekérdezési-pont szomszédsága egy (r) sugarú körben:

$$\mathcal{N}_{p_s} = \{\mathbf{p}_i \mid \|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_i\| < r\} \quad (13)$$

A \mathbf{p}_s lekérdezési pont (14. egyenlet) egyszerűsített pontjellemező hisztogramja (SPFH) (5. egyenlet) az összes pontpár szögjellemezőinek hisztogramja, amelyben az első pont a lekérdezési pont (\mathbf{p}_s), a második pont pedig a szomszédjai [137]:

$$\{(\mathbf{p}_s, \mathbf{p}_i) \mid \mathbf{p}_i \in \mathcal{N}_{p_s}\} \quad (14)$$

Két lépésben (15. egyenlet) megkaphatjuk egy p_s lekérdezési pont FPFH tulajdonságát. Először kiszámításra kerül a \mathbf{p}_s . lekérdezési ponthoz tartozó SPFH (Simplified Point Feature Histogram) érték. A második lépésben kiszámításra kerül az SPFH érték \mathbf{p}_i pont környékén található minden egyes pontra ($\mathbf{p}_i \in \mathcal{N}_{p_s}$). Miután lemértük a szomszédos pontok hisztogramját a távolsággal, megkapjuk a végső FPFH hisztogramot [138]:

$$FPFH(\mathbf{p}_s) = SPFH(\mathbf{p}_s) + \frac{1}{|\mathcal{N}_{\mathbf{p}_s}|} \sum_{i=1}^{|\mathcal{N}_{\mathbf{p}_s}|} \frac{1}{\omega_i} \cdot SPFH(\mathbf{p}_i), \quad (15)$$

ahol ω_i a \mathbf{p}_s lekérdezési pont és a szomszédja \mathbf{p}_i közötti távolság \mathbf{p}_i ($\mathbf{p}_i \in \mathcal{N}_{\mathbf{p}_s}$). Ugyanezeket a lépéseket hajtjuk végre \mathbf{Q} esetében is.

3.2.2 Pontfelhők egymásra illesztése

Az Iterative Closest Point (ICP) algoritmust használtam a pontfelhők közötti párosítások létrehozására. Az algoritmus iteratív módon illeszti a forrás pontfelhő pontjait a cél pontfelhő pontjaihoz, minimalizálva a gyöker-négyzetes hiba függvényt. Az ICP algoritmus segítségével a pontfelhők pontosan illeszthetők egymáshoz, ami lehetővé teszi a hegesztési hibák pontos azonosítását.

Fast Global Registration (FGR), majd Iterative Closest Point (ICP) algoritmusok

A \mathbf{p}_i és \mathbf{q}_i pontok közötti hozzávetőleges regisztrációt végezzük el, hogy a két pontfelhőt összeillesszük, amihez pontleíró kiszámítása szükséges. Az FGR egy olyan transzformációt becsül meg, amely a két pontfelhőt a pontmegfelelések alapján illeszti össze. Bár az FGR gyorsabb, mint az ICP, nagy pontfelhők esetén jobb teljesítményt nyújthat, de önmagában nem ad elegendő eredményt. Ezért egy helyi finomító algoritmusra van szükség az illesztés további pontosításához. Az ICP kezdeti átalakítást igényel, ezért gyakran az FGR-rel együtt használják. Az iteratív egyeztetés során az ICP módszert alkalmazzuk a \mathbf{P} és \mathbf{Q} mátrixok között [139]. Az ICP algoritmus a következő lépéseken keresztül iterál:

1. Megfelelések meghatározása:
 - Először keresünk egy \mathcal{C} megfelelési halmazt, amely egyező indexpárokat tartalmaz. A \mathbf{P} felhő minden pontjához megkeressük a legközelebbi szomszédját a \mathbf{Q} -ból. Az indexeik egy párt alkotnak.
2. Transzformációs becslés:
 - Két ponthalmaz tömegközéppontjának meghatározása (16. és 17. egyenlet szerint);

$$\mu_Q = \frac{1}{|\mathcal{C}|} \cdot \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} \mathbf{q}_i \quad (16)$$

$$\mu_P = \frac{1}{|\mathcal{C}|} \cdot \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} \mathbf{p}_j \quad (17)$$

- Majd vonjuk ki minden pontból a megfelelő tömegközéppontot (18. és 19. egyenletek):

$$\mathbf{q}'_i = \mathbf{q}_i - \mu_Q \quad (18)$$

$$\mathbf{p}'_j = \mathbf{p}_j - \mu_P \quad (19)$$

- Keressük meg a \mathbf{t} translációs vektort és az \mathbf{R} forgatási mátrixot (20. egyenlet), amely minimalizálja a négyzetes hibák összegét:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{(i,j) \in C} \|\mathbf{q}_i - \mathbf{R}\mathbf{p}_j - \mathbf{t}\|^2 \quad (20)$$

- Ez a probléma megoldható a szinguláris értékkompozícióval (SVD, 21. egyenlet), amely a pontok közötti távolság minimalizálására szolgál [140]. Kiszámítjuk a kereszt-kovariancia mátrixot:

$$\mathbf{W} = \sum_{(i,j) \in C} \mathbf{q}'_i \mathbf{p}'_j{}^T \quad (21)$$

- Ezután az SVD-t (22. egyenlet) használjuk a dekompozícióhoz:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T \quad (22)$$

ahol \mathbf{U} és \mathbf{V} 3 x 3-as rotációs mátrixok.

Ha a \mathbf{W} rang 3, akkor az $E(R, t)$ minimalizáló paraméterek egyediek lesznek, és a következő [141] és (24) egyenletekből adódnak:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T \quad (23)$$

$$\mathbf{t} = \mu_Q - \mathbf{R}\mu_P \quad (24)$$

3. Transzformáció

Végül megkaphatjuk az elforgatott pontokat (25. egyenlet):

$$\bar{\mathbf{p}}_j \leftarrow \mathbf{R}(\mathbf{p}_j - \mu_P) + \mu_Q \quad (25)$$

4. Iteráció

Az 1–3. lépéseket megismételjük, magát az átalakítást finomítva, közelebb kerülve a két pontfelhő közötti átfedéshez, hogy a felhők jobban illeszkedjenek egymáshoz.

Az ICP után egy végső transzformációt kapunk, amivel átalakíthatjuk a pontfelhőt. Ha két pontfelhő egy vonalba került, kiszámítható a köztük lévő távolság.

3.2.3 Sűrűség-alapú klaszterezés

A DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algoritmust használtam a klaszterezéshez [142]. Ez az algoritmus képes azonosítani a sűrűség-alapú klasztereket, és hatékonyan kezeli a kiugró értékeket. A DBSCAN algoritmus előnye, hogy nem szükséges előre meghatározni a klaszterek számát, mivel az algoritmus automatikusan felismeri a klasztereket a sűrűség alapján.

Az ICP után az Open3D által biztosított pontfelhőtávolság számítási módszerével kiszámíthatjuk két pontfelhő közötti távolságot. Minden egyes forráspontfelhőnél kiszámítja a célpontfelhőben lévő legközelebbi pont távolságát. Az euklideszi távolságot (26. egyenlet) használjuk a távolság kiszámításához:

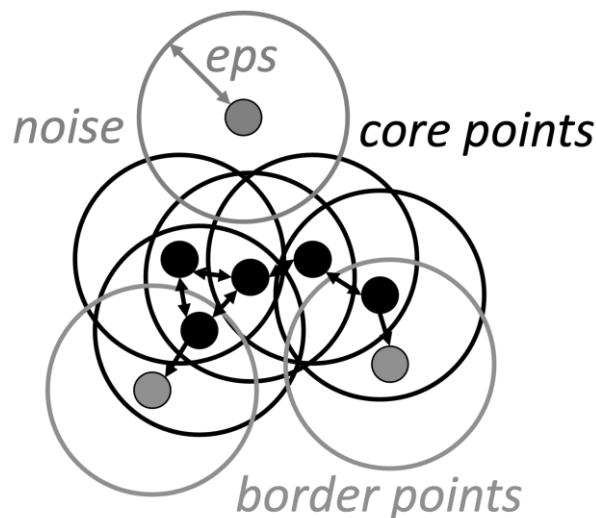
$$NN_Q(\bar{\mathbf{p}}) = \|\bar{\mathbf{p}} - \mathbf{q}\|_2 \mid \bar{\mathbf{p}} \in \bar{\mathbf{P}} \wedge \mathbf{q} \in \mathbf{Q} \wedge \mathbf{q} \quad (26)$$

Az értékek közelítenek a nullához, ahol a két felhő elhelyezkedése egymáshoz közel azonos. A távolság azonban megnő, ha eltérés vagy hegesztési hiba áll fenn. A távolságértékeknél egy küszöbérték határozható meg, ahol kiválasztható azt a felső néhány ezer pontot, amelyek a két pontfelhő helyzete szempontjából „legtávolabbinak számítanak” egymáshoz képpes. Ez lehet százalék küszöb vagy egy meghatározott távolság. Az $NN_Q^{10}(\bar{\mathbf{p}})$ az $NN_Q(\bar{\mathbf{p}})$ felső tíz százalékaként van csoportosítva a legtávolabbra eső 25000 pont esetén. A gyakorlat azt mutatja, ha ennél az értéknél már kevesebb pont az, amivel számolunk, akkor a hibadetektálás folyamata elkerülhet bizonyos hibákat. Ha nagyobb értékkel számolunk akkor pedig beleszámol, olyan részeket is az alkatrész felületeiről, amelyek az elfogadható hibahatár alá esnének.

Mivel ezen pontok elhelyezkedése a sűrűség függvényében változik, alkalmasak sűrűség alapú elemzésre. Így a (rendezett) távolságértékek tekintendők a sűrűség alapú algoritmus bemeneti adatkészletének.

A klaszterezés távolság vagy sűrűség mértékén alapulhat. A DBSCAN algoritmus egy hagyományos sűrűség alapú klaszterezési módszer, amely OPEN3D Python környezetben került lefuttatásra. A DBSCAN azonosítja az adatkészlet pontjait a nagy sűrűségű régiókban, és magpontként jelöli meg őket, amint az a 19. ábrán feketével látható.

Ezek a magpontok klaszterek létrehozására szolgálnak, azaz sűrűség alapján elhelyezkedő pontok, vagyis adatrégiók meghatározására. A magpontoktól kiindulva a klaszterek bővülnek, és egy bizonyos távolságon belüli pontokat (*eps*-paraméter) adnak hozzá. A DBSCAN algoritmusban a *minpoints* paraméter határozza meg a klaszterek minimális pontszámát, amely szükséges ahhoz, hogy egy pontot sűrű régiónak vagy érvényes klaszternek tekintsünk. A magpontoknak előre meghatározott számú pontot (*minpoint*) kell tartalmazniuk az *eps* szomszédságában. A klaszterszám azt jelzi, hogy egy klaszter minimálisan hány pontból állhat. A határpontok (19. ábra, narancssárga színnel jelölve) olyan pontok, amelyek nem tartalmaznak elegendő szomszédos pontot. Azok a pontok, amelyek nincsenek a magpont *eps* távolságán (detektáló kör sugara) belül, zajnak minősülnek.



19. ábra DBSCAN működése, magpont és határpontok helyzete [142]

A DBSCAN algoritmus azzal kezdődik, hogy véletlenszerűen kiválaszt egy pontot, és ellenőrzi, hogy a kiválasztott pont magpont-e (ha az *eps*-környékében legalább minimum pontnyi minimális pontot tartalmaz). Esetünkben az *eps* érték a *pcr* értékhez [143] kapcsolódik (27-as egyenlet), amely a pontfelhő egyes pontjai és szomszédai közötti távolság számtani középértékének nagyságát tartalmazza (ahol a hányados a mintavétel):

$$pcr(Q) = \sum_{\bar{p} \in Q} NN_Q(\bar{p})/N \quad (27)$$

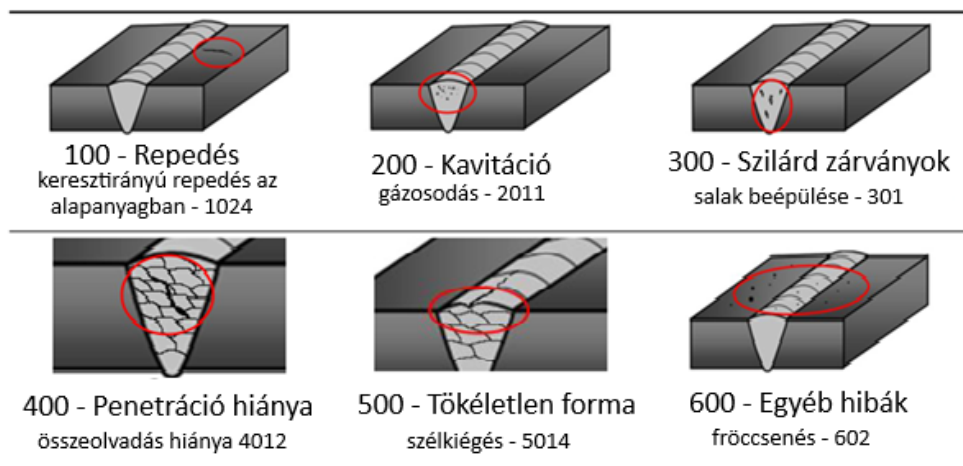
A klaszterezés után kiválaszthatjuk a problémásnak tűnő klasztert, és az RMSE (Root Mean-Square Error) képlet segítségével (28. egyenlet) határozhatjuk meg a fő felhőtől való távolságát. RMSE a következő képlettel számítják ki:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (p_i' - q_i')^2}{N}} \quad (28)$$

ahol a nevező pedig a mintavételi mennyiség. Az azonosított klaszterek (hibák) minden egyes pontja esetén megvizsgáljuk, hogy milyen messze van a referencia legközelebbi szomszédjától. A magasabb RMSE érték a vizsgálat szempontjából problémásabb klasztert jelent.

3.2.4 Szabványhoz igazítás

A hegesztési hibák felmérésére hegesztéstechnológiai szabványok szolgálnak, amelyek segítségével pontosan meg lehet határozni a varratok megfelelőségét. Az egyik ilyen szabvány az ISO 6520-1:2007, amely a hibák fő osztályozásával [144] és azok pontos leírásával foglalkozik. A hat fő hibacsoport leírása táblázatos formában történik, mindegyikhez egy-egy példa tartozik (20. ábra).



20. ábra Főbb hiányosságok és példák (ISO 6520-1 [33] szerint). A tökéletlenségek főbb csoportjainak listája, a hozzájuk tartozó csoportszámok és leírások, valamint mindegyikre egy példa tökéletlenség egy kísérő ábrával együtt.

A másik szabvány, amely részletesen mutatja az egyes varrat eltéréseket és azok határait, az ISO 5817:2014. A hegesztési hibákat aszerint kategorizálom, hogy a kifejlesztett algoritmus alapú megoldással kimutathatók-e. A szabvány három minőségi kategóriában tartalmaz határértékeket, vagy a nem megengedett és megengedett feltételekkel jelzi az elfogadhatóságot. A hegesztett kötések elfogadhatósága a hegesztési varrat hibáinak látható hiányán és a vonatkozó eljárási vizsgálati szabványban leírt összes vizsgálat megfelelőségén alapul. Minden típusú hegesztéssel kapcsolatos eltérésnek van „katalógusszáma” vagy besorolása, megadott határértékekkel. A tökéletlenségek száma a szabványban rögzített eltérések száma. Ezt A5-ös varratméretekre számoltuk.

3.3 Adatok integrálása hegesztő robot munkafolyamata közben

A digitális virtuális interfész segítségével a gyártási folyamatok során keletkező adatokat kinyerjük és visszacsatolásként integráljuk, hogy becsüljük a hiányzó adatokat és szimulációkat futtassunk. A keretrendszerhez használt virtuális robot lehetővé teszi a hegesztési robot mozgásának és a hegesztési paraméterek (áram, feszültség) valós idejű megfigyelését és rögzítését. Így a keretrendszer által gyűjtött adatok elemzése után lehetőség nyílik további adatok integrálására, például a 3D szkennerek és a képfeldolgozó algoritmusok által nyújtott információk alapján. A lépések a következők szerint alakulnak:

1. Virtuális Iker alkalmazása:

- A virtuális robot alkalmazása lehetővé tette a hegesztési folyamatok valós idejű monitorozását és optimalizálását. Az adatgyűjtési keretrendszer által rögzített információcsomagokat integrálták a pontfelhők jellemzőivel és az élészlelési algoritmusok által kinyert varratszélesség adatokkal.
- A digitális iker technológia előkészítése valós idejű visszacsatolást biztosít a hegesztési paraméterek optimalizálásához, paraméterek becsléséhez.

2. Kísérleti tervezés:

- A hegesztési sebességek 30 cm/min és 70 cm/min között változtak, míg a hegesztési paraméterek 18 V/40 A és 23.8 V/200 A között mozogtak.
- A kutatás során 450 hegesztési próbavarrat készült, változó hegesztési sebességgel vagy változó hegesztési paraméterekkel beállításával.

3. Adatgyűjtés illesztés és képfeldolgozás folyamataiból

- A hegesztési varratok minőségellenőrzése során 3D szkennerek alapú vizsgálati folyamatokat alkalmaztam. A pontfelhők feldolgozása és illesztése segített a elkészített hegesztési varratok geometriájának meghatározásában.
- A hegesztési varratok szélességének meghatározásához különböző élészlelési algoritmusokat használtam, mint például a Sobel, Prewitt és Canny algoritmusokat.

4. Adatfúzió:

- Az adatfúzió során a pontfelhőelemzés és a képfelismerés adatait egyesítettem, hogy pontosabb és megbízhatóbb eredményeket kapjak.

3.3.1 Virtuális iker alkalmazása

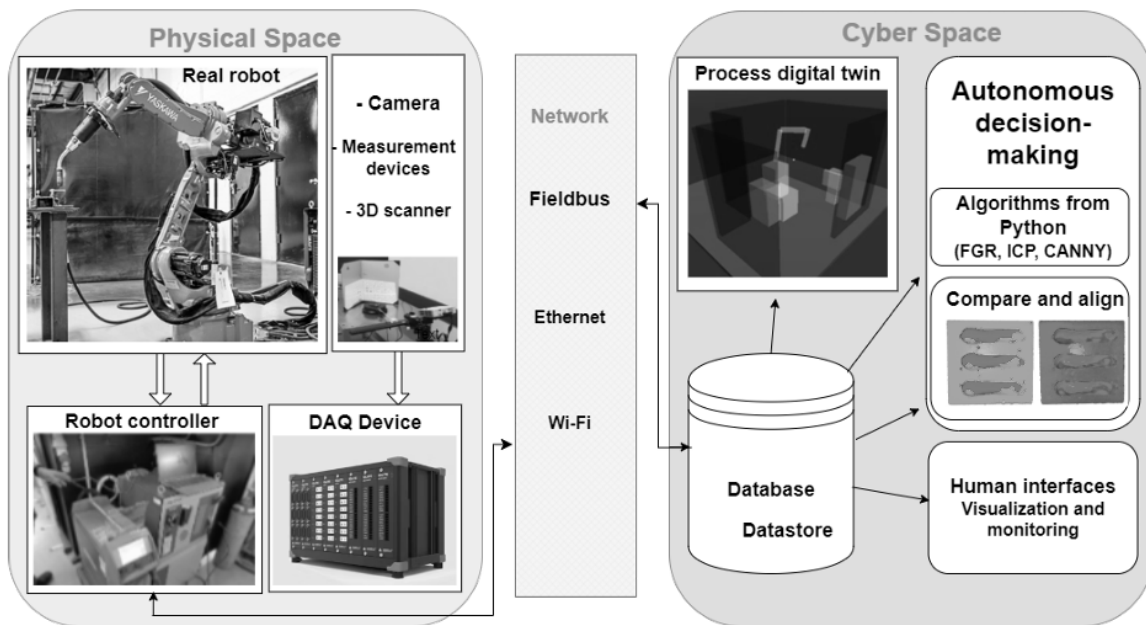
A tervezett támogató tesztrendszer akkor válik teljessé, amikor az optimális értékek javaslata meg tud történni, közeledve ezzel az autonóm gyártás irányába.

Az alkatrészek valós hegesztése mellett tehát párhuzamosan dolgozik a virtuális robot, amelyet a csatlakoztatott számítógépen lekövethető. A csatlakozás két részből áll, egyrészt a robot vezérléséhez, másrészt a hegesztőgép tápellátásához történő csatlakoztatásából.

Mivel a szoftverköteg alrendszerei közötti kommunikáció időigényes, fontos volt egy egyszerű architektúra kialakítása. A rendszer két különálló programból áll: RobotComm és RobotVis [145]. Az operációs rendszer socket programozási felületét használva a RobotComm program összekapcsolja a robotot a RobotVis programmal, amely jelenleg csak pozícióadatokat kér és továbbítja is azokat. Ideális esetben ez a funkció a RobotVis része lenne, de a hegesztőrobothoz rendelkezésre álló kommunikációs szoftverkönyvtárat .NET keretrendszerrel fejlesztették ki, és a korlátozások miatt jelenleg nem volt közvetlenül beágyazható.

A RobotVis fő célja az adatok összesítése, feldolgozása és megjelenítése. Indítás után automatikusan kapcsolatot létesít a RobotComm programmal és a felhasználó kérésére a hegesztő áramforrással is. Az adatokat a készülék beépített webes felülete olvassa be, amely automatikusan frissíti a megjelenített értékeket a WebSocket segítségével.

Az adatokat egy böngésző megnyitott alkalmazása olvassa be, amely a Selenium nevű programcsomagot használja, és egy Python-interpreterrel működik, amely dinamikus könyvtárbetöltő funkcióval van párosítva. A rendszer a hegesztési folyamat lezajlása után képes volt a rögzített adatok visszajátszására, ezzel az új optimalizációs lehetőségek újragondolására teret adva.



21. ábra Automatizálási struktúra [146]

Az informatikai elemek és az automatizálási architektúra megfelelő szintjeinek kapcsolata az 21. ábrán látható módon történik. Így a robot, mint eszköz a terepről és az érzékelésből származó információkat csatolja a robothoz tartozó szintről a felügyeleti szintre. A RobotVis program összesíti a begyűjtött adatokat, így képes az adatok nyilvántartására, elvégezve a megjelenítést is. Mivel az adatok rögzítésre is kerülnek, ezért ez később a rögzített adatok visszajátszására, új optimalizálási lehetőségeket teremt.

A következő típusú eszközök kerültek felhasználásra a rendszer összeállításához:

- A robotkar Yaskawa AR1440-A cikkszám: 9519201 cellába szervezve; kéttengelyes rotátor: Yaskawa MT-1-250S2D Cikkszám: 124614100
- Hegesztőgép: Fronius TPS400i-cikkszám: 4,075,179

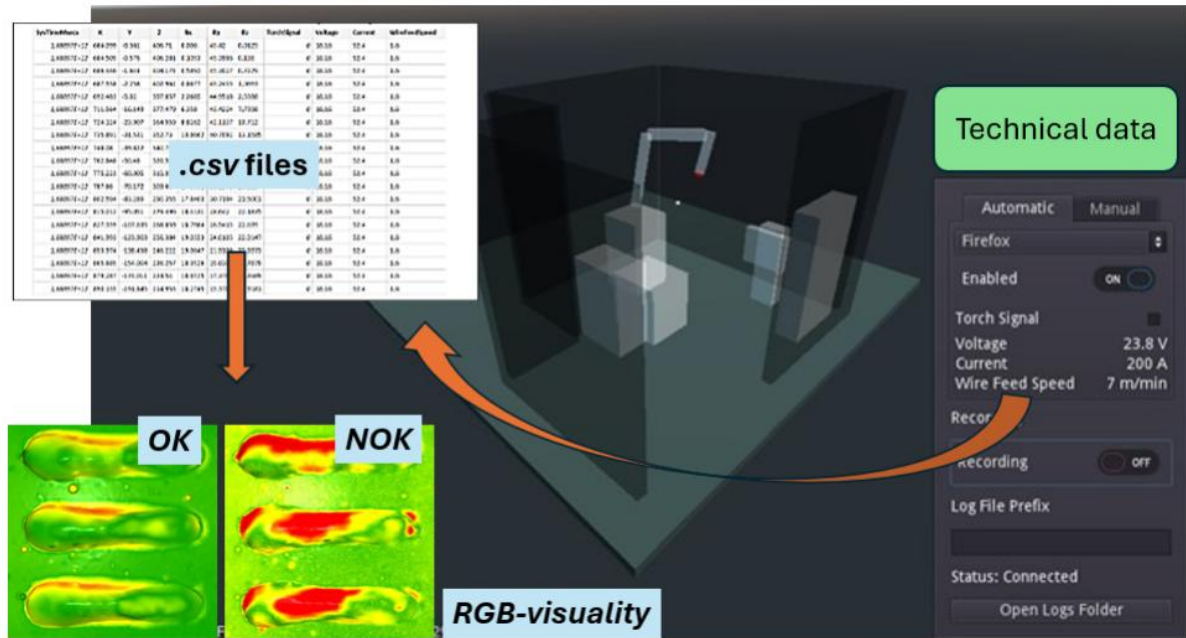
Mind a robot, mind a hegesztő áramforrás szabványos Ethernet, illetve TCP/IP protokollt használ.

Machine Learning előkészítése

Az adatok integrációja két nagy csoportra osztható: adatgyűjtésre és adatfeldolgozásra, ezt követően pedig az interakcióra és az optimalizálás folyamatára.

Az adatgyűjtés történhet a robot mozgásából származó (robot mozgásának követése, szögelfordulás szenzor által) jelek által, vagy varrat keletkezése alatt rögzített adatokból is.

A becsléshez nem elég algoritmusokat létrehozni, ezeknek a mélyhálóknak később meg kell tanulniuk a konkrét gyártási eseményeket is [26]. A virtuális robot vizuális platformja, a varrat keletkezés során rögzített gyártási katalógussal, a következőképpen néz ki (22. ábra).



22. ábra Technikai megvalósítás [146]

Becsléshez Python háttér- környezetben, az adatok beolvasásához Pandas könyvtárat használtam. A gyűjtött adatok közül kiválasztjuk a jellemzőket (feszültség, áramerősség, hegesztési sebesség), majd a célváltozót (varratszélesség) mint jellemzőt. Ezután következhet a modell létrehozása és batanítása, ahol a lineáris regresszió modellt választottam, előrejelzéseket várva új varratszélességekhez. Numpy könyvtár [147] telepítése után sklearn.linear csomagból [148] importálom a linearRegression modelt.

Varratkészítés során gyűjtött adatok:

- a rendszer bekapcsolása óta eltelt idő;
- mozgás koordinátái;
- hegesztéshez kapcsolódó villamos paraméterek (áramerősség, feszültség, huzaladagolási sebesség, hegesztési sebesség);
- a hegesztés folyamatának futása (igen/nem).

Varrat elkészülése után generált adatok:

- a varratok szélessége képalkotásból
- becsült paraméterek (méretháló rávetítése vagy becslés alapján)

```

import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression

# Adatok beolvasása a CSV fájlból
data = pd.read_csv('31_2023-07-10_12-48-4.csv')

# Jellemzők és célváltozó kiválasztása az adatokból
X = data[['feszültség', 'áramerősség', 'hegesztési sebesség']]
y = data['varratszélesség']

# Modell létrehozása és betanítása
model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

# Előrejelzések készítése varratszélességre (példa: új adatpontokra)
X_new = np.array([[20, 150, 5], [25, 200, 6]])
y_pred = model.predict(X_new)

# Paraméterek és intercept nyomtatása
print(f"Koefficiensek: {model.coef_}")
print(f"Intercept: {model.intercept_}")

# Előrejelzések nyomtatása az új adatpontokra
print(f"Előrejelzések az új adatpontokra (varratszélesség): {y_pred}")

```

23. ábra Lineáris regresszió modell futtatása Python környezetben [148]

A 31-es alkatrészhez kapcsolódó csv file esetén (31_2023-07-10_12-48-4.csv) kiválasztásra kerülnek a jellemzők (feszültség, áramerősség, hegesztési sebesség) és a célváltozó (varratszélesség), majd létrehozza és betanítja a lineáris regressziós modellt a 23. ábra szerint.

3.3.2 Kísérleti tervezés

Az adatrögzítéshez hegesztési kísérletet hajtottam végre. A hegesztési folyamat okozta hőhatások torzítják a mérési eredményeket, a geometriai méretek megtartása kulcsfontosságú, ezért bizonyos időnek el kell telnie amíg a hűlés folyamata lezárul.

A hegesztési varratokkal ellátott laposvaslemez munkadarab méretei a következők:

- 50 mm * 50 mm * 6 mm (szélesség * hossz * magasság),
- alkatrészenként három azonos bemeneti paraméterű, 35 mm hosszú varrattal.

Összesen 150 alkatrész készült el (5 csoport, csoportonként 30 alkatrész). A hegesztési sebességek csoportonként változtak (30-40-50-60-70 cm/perc), szinergikusan növekvő elektromos paraméterekkel (18-23,8V és 40-200A között). A hegesztés megkezdésével egyidejűleg indul a virtuális robot is (Digitwin rendszer előkészítése).

Először a munkadarabok „soronkénti” pontfelhőit vizsgálom, amelyek állandó hegesztési sebességgel és növekvő hegesztési paraméterekkel rendelkeznek (1-15-30, 60-75-90 és 121-135-150). A második esetben „oszloponkénti” tesztet alkalmazok, azaz azonos térbeli távolságban lévő munkadarabok pontfelhőit hasonlítják össze. Minden csoportból az első, a középső és az utolsó elemek pontfelhői kerülnek párosításra. Ahol a feszültség és az áram értéke nem változik, de a hegesztési sebesség igen (1-61-121, 15-75-135 és 30-90-150), ott a 30-70 cm/perc, 40 cm/perc és 60 cm/perc-ig terjedő csoportok a minimális változtatások miatt kimaradnak (24. ábra).

Az alkatrészek későbbi azonosítása érdekében a munkadarabok sorszámával vannak ellátva, így a sorozatszám kódhoz kapcsolódnak a feszültség/áram/hegesztési sebesség értékei:

Először a vízszintes elhelyezkedés szerint kerülnek kiválasztásra a munkadarabok. Ahol soronként tehát állandó a hegesztési sebesség és ez szinergikusan növekvő hegesztési paraméterekkel (18 V és 40 A, 21 V és 120 A valamint 40V és 200A) párosul. A következő munkadarabok tehát amelyek egymáshoz képest vizsgálatra kerülnek:

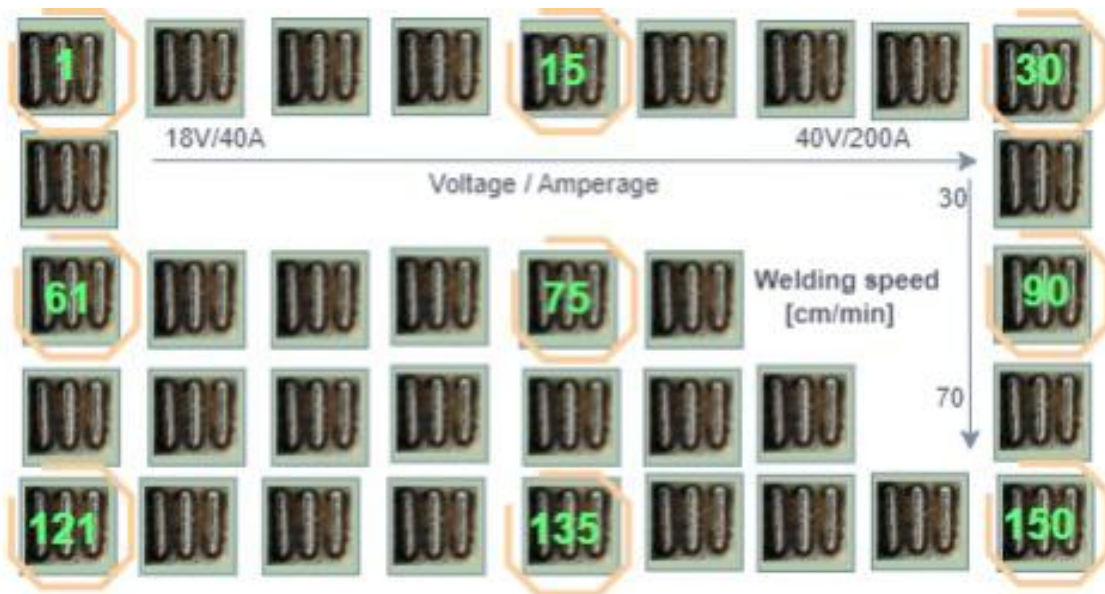
- 1 - 15 – 30 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 30cm/perc
- 61 - 75 – 90 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 50cm/perc
- 121 - 135 – 150 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 70cm/perc.

A második esetben a függőleges elhelyezkedés szerint kerülnek kiválasztásra a munkadarabok. Ebben az esetben a hegesztési sebesség változó, ami oszloponként állandó hegesztési paraméterekkel párosul. Minden csoportból az első, a középső és az utolsó elemek kerülnek egymásra illesztésre:

- 1 - 61 - 121 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 30-50 majd 70cm/perc
- 15 - 75 - 135 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 30-50 majd 70cm/perc
- 30 - 90 – 150 számú alkatrészek, ahol a hegesztési sebesség 30-50 majd 70cm/perc.

A 40 cm/perc és 60 cm/perc hegesztési sebességű csoportokat kihagyjuk a minimális változtatások miatt, később ezekre a helyekre becsléssel keresünk értékeket.

Az adatok valós idejű gyűjtése .csv fájlokban történik, ami lehetőséget teremt későbbi vizsgálatokra és szimulációs esettanulmányokra. Az adatok több ezer sor információt is jelenthetnek, amelyek mérete 100 kbyte lehet.



24. ábra Hegesztési kísérlet

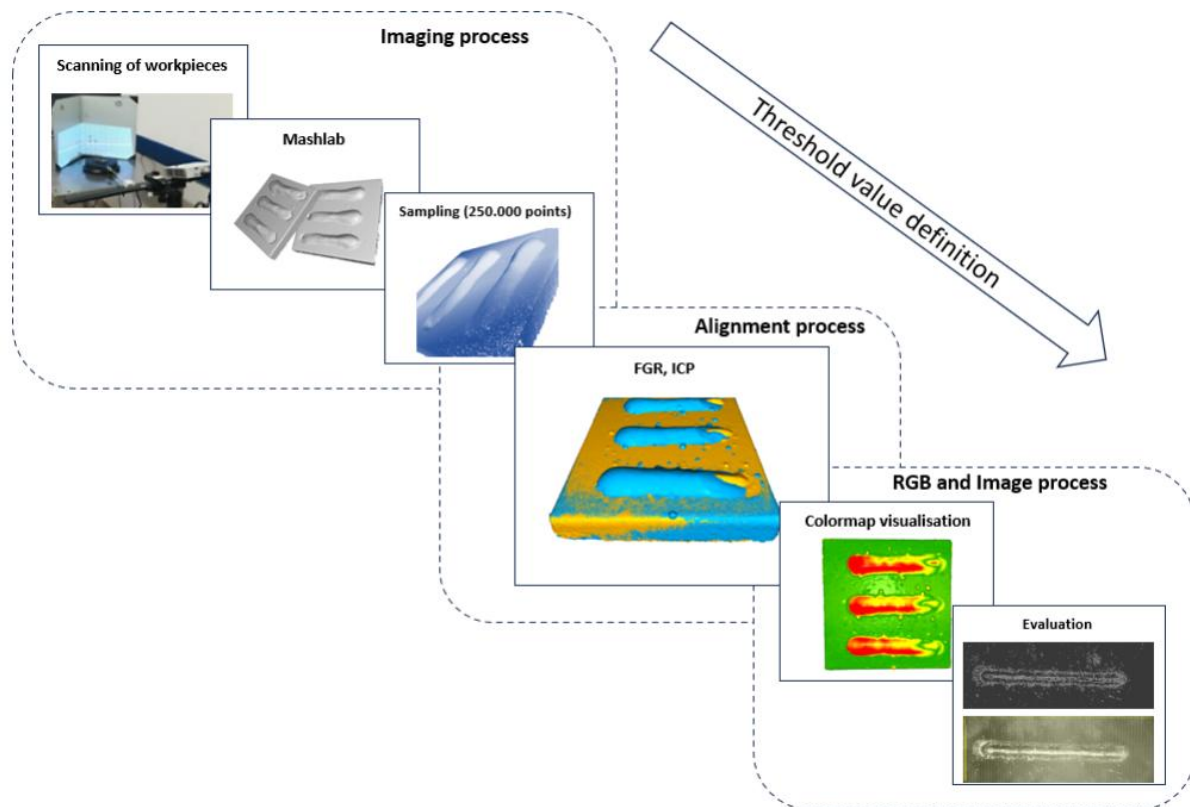
3.3.3 Adatgyűjtés az illesztés és képfeldolgozás folyamataiból

Ha a hegesztési varratok felületi különbségeit keressük, az egyik legjobb eredményt az alkatrész pontfelhőinek összehasonlításával érhetjük el, ami egyben az ellenőrzési folyamat hatékonyságának növelését is jelenti. A javasolt folyamat a kiválasztott munkadarabok (25. ábra) szkennelésével kezdődik, majd a felhők illesztésével folytatódik. Aztán a virtuális robot által történt adatgyűjtés során vett információkat, csatoljuk a pontfelhők illesztése által kinyert adatokhoz, mint leíró adatokat.

	18V_40A	21V_133A	23,8V_200A
30 cm/min			
50 cm/min			
70 cm/min			

25. ábra A kiválasztott munkadarabok [145]

A vizsgálat célja, hogy korrelációkat találjon a pontfelhő elemzéséből származó különbségek között az illesztési eljárás segítségével (26. ábra). Ez magában foglalja az elektromos paraméterek és a visszacsatolási adatok integrációját, például a varrat alakjának minősítését.



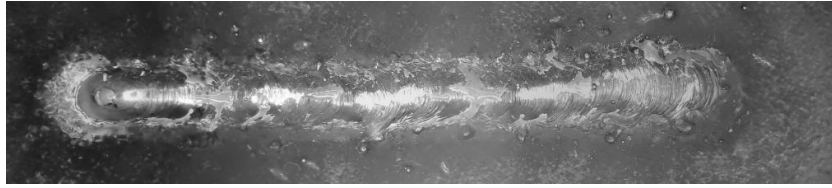
26. ábra Képkötés és képelemzés a gyakorlatban [145]

Adatgyűjtés varratokról készült képekből és becsléssel

A hegesztési varratok további vizsgálatával a varrat elkészítésekor (esetleg a varrat készítése közben) fényképek készültek az élek észleléséhez (27. ábra). A hegesztési élek meghatározása minden esetben előkészítő algoritmusokat igényel. Ezek lehetnek különböző szűrők (szűrkeségi szűrő [149], modulációs szűrő [150]) vagy zajszűrők (28. ábra).

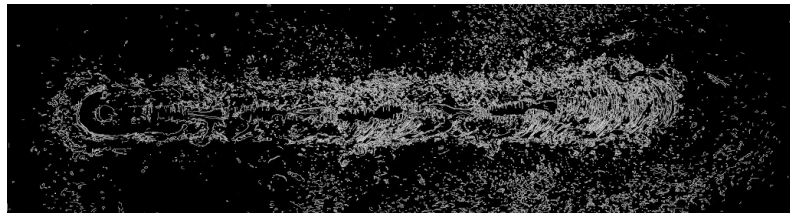


27. ábra Varratról készült fénykép



28. ábra Hegesztési varrat szűrkeség és elmosás filterek után

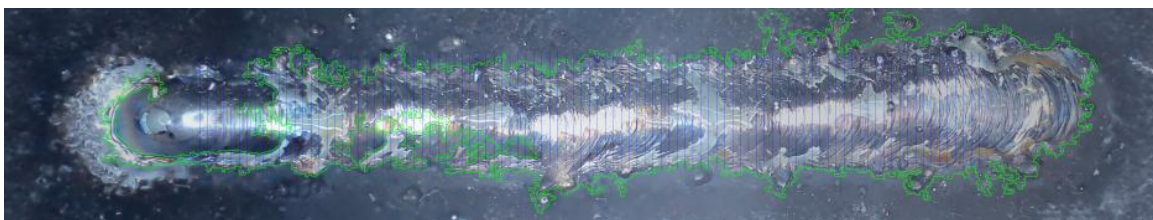
Az érzékelés többlépéses folyamatát (29. ábra) követheti az éldetektáló algoritmusok folyamata, mint például a Sobel [151], a Prewitt [152] vagy a Canny [153] algoritmusok. A Canny algoritmust John F. Canny fejlesztette ki, a fő lépések között a zajcsökkentés és intenzitásgradiensek keresése áll. Az első lépés általában a kép simítása és a zaj eltávolítása történik meg Gauss-szűrővel [154]. Ezután a simított képen kiszámítják az intenzitás gradienseket, amelyek az élek irányának háttére és erőssége miatt fontosok.



29. ábra Hegesztési varrat Canny algoritmus folyamata után

Az intenzitás gradiensek meghatározásához először a kép minden egyes pixelének intenzitásváltozását kell kiszámítani. Ezt általában két irányban, vízszintesen (x irányban) és függőlegesen (y irányban) végezzük. A leggyakrabban használt módszer a Sobel-operátor, amely két különböző 3x3-as konvolúciós mátrixot alkalmaz a kép x és y irányú deriváltjainak közelítésére [154]. Végül következik az élkövetés folyamata hiszterézissel, ahol az algoritmus egyesíti a gyenge és erős éleket a folytonosság fenntartása érdekében.

A rendelkezésre álló algoritmusok széles skálája ellenére a kiválasztott munkadarabokról készült fényképek tisztítása és érzékelése nem egyszerű feladat, több esetben nem vezetett konkrét eredményre (30. ábra).



30. ábra Varrat szélesség detektálás merőleges vonalak átlagolásával

A bemeneti fényképek állandó 2000*6000 pixelméretét felhasználva, a pixelben megkapott értékek milliméterbe átszámíthatóak (jelen esetben 540 pixeles átlagérték, 4,5 mm-es szélesség magasságot jelent).

Varratszélesség meghatározása becsléssel

Az éleolvasással keletkezett adatokat felhasználva Machine Learning alapú könyvtárakat használtam fel adatbecslés céljából. Az adatgyűjtés mindig az adatok előkészítésével indul. Az összegyűjtött adatokat elemzésre előkészítjük. Ez biztosítja, hogy az adatok összehasonlíthatók és kompatibilisek legyenek az algoritmusok alkalmazásakor. Az adattisztítás során zajos vagy hiányos, illetve redundáns adatok eltávolításra kerülnek (a pontfelhők egyesítése mintavételi folyamattal vagy a CSV-fájlok közös léptékbe hozása).

Ezt követi az adatfúzió, ahol a pontfelhőelemzésből és a képfelismerésből származó adatok integrálásra kerülnek. A virtuális robot alkalmazása lehetővé teszi a hegesztési folyamatok valós idejű nyomon követését, a folyamatok későbbi optimalizálását. Adatfúziós célok, hogy az adatok kombinálásával pontosabb és megbízhatóbb eredményeket kapjunk.

Ezután a digitális ikertechnológia előkészítéseként, szimulációs folyamatok futtatása történik az elemzéshez és becsléshez.

3D szkennelés/képfeldolgozás és a digitális iker technológia előkészítésének integrálása, lehetővé teszi a hegesztési folyamatok pontos és megbízható elemzését.

Összefoglalva, a kutatás során alkalmazott módszerek és eszközök, valamint a kutatási terv bemutatják a hegesztési varratok szélességének meghatározását élészlelési algoritmusok segítségével, és a digitális iker technológia előkészítésének alkalmazását a hegesztési folyamatok optimalizálására és hibák minimalizálására.

3.4 Additív gyártás, utólagos hőkezeléssel

A 3D nyomtató által készített alkatrészek egyik legnagyobb korlátja az extrudálási eljárásból származó mechanikai anizotrópia. Termikus utófeldolgozással (material-extrusion-based, ME [155]) ez a fajta kötési képesség javítható; ehhez azonban új berendezés/gép használatára lenne szükség.

A „lusta lágyításos” termikus utófeldolgozási módszer, ahol az alkatrészeket a 3D nyomtatón kezelik, nem igényel új berendezést. Ezzel az egyszerű módszerrel is jelentős növekedés érhető el a mechanikai tulajdonságok esetén.

A legyártáshoz és kötődő hőkezeléshez a lépések a nyomtató beállításával indulnak:

- **Nyomtató adatai:** A vizsgálat elvégzéséhez a tesztmintákat egy Creality Ender 3 V2 Neo ME (más néven FDM) géppel lett nyomtatva [156].

- **A tesztgeometriákhoz** vagyis a hőkezelési folyamat előzetes teszteléséhez kisebb hasábokat mintákat nyomtattam, amelyek mérete $30 \times 4 \times 10$ mm volt.

A hőkezelési utófeldolgozáshoz a 3D nyomtató ágyát használtuk, amely akár 100°C -ra is felmelegíthető. Egy hőszigetelt fémlemezről készült kamra biztosította a zárt teret. A hőkezelési időtartamok 1, 2,5 és 4 óra voltak.

A szakítóvizsgálatokhoz Zwick Roell Z100 univerzális gépet használtam. A méréseket 22°C -on végeztem el, a vizsgálati sebesség 10 mm/perc volt. A külső felület, a rétegek közötti változások és a hőkezelés hatásainak vizsgálatához Zeiss Axio Imager A2m mikroszkópot használtam.

4. Tudományos eredmények bemutatása

4.1 Eredmények bemutatása CAD modellek illesztése esetén

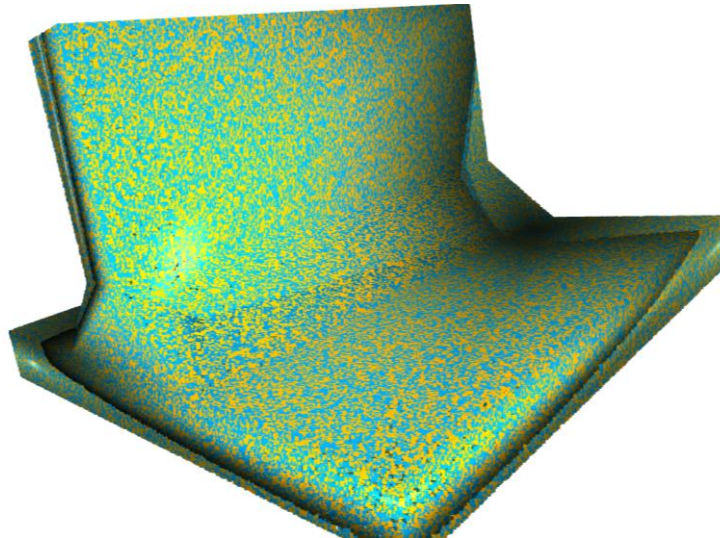
A CAD pontfelhők illesztésének folyamata után bemutatásra kerülnek a sűrűség alapú klaszterezés eredményei. A kapcsolódó szabvány három minőségi kategóriát (B, C, D) fogalmaz meg. A szabvány egyre megengedőbb a kategóriákban előre haladva, például a túlzott konvexitás magassága legfeljebb 3 mm lehet B kategória esetén, 4 mm a C kategóriánál és legfeljebb 5 mm a D kategória esetében.

Táblázat 1. Hibacsoportokhoz kapcsolódó értékek (saját szerk.)

Határ értékek			
Hiba kategóriák	B	C	D
Repedés	nem engedélyezett	nem engedélyezett	nem engedélyezett
Túlzott konvexitás	3 mm	4 mm	5 mm
Tökéletlenségek	nem engedélyezett	1 mm	2 mm
Eltérő gyökérméret	3 mm	4 mm	5 mm
Végkráter	nem engedélyezett	4 mm	5 mm
Szélkiégés	0,5 mm	0,5 mm	1 mm
Túlzott aszimmetria	2,25 mm	2,75 mm	3 mm

4.1.1 Repedés

A repedéshez tartozó hegesztési hibacsoport szabvány száma 100. A teszthez egy 0,5 mm × 0,2 mm × 0,1 mm méretű „téglatest-üreg” került létrehozásra a CAD modell felületén (31. ábra). A keretrendszer számára az illesztett pontfelhőben lévő változás az etalon pontfelhőhöz képest nem érzékelhető.

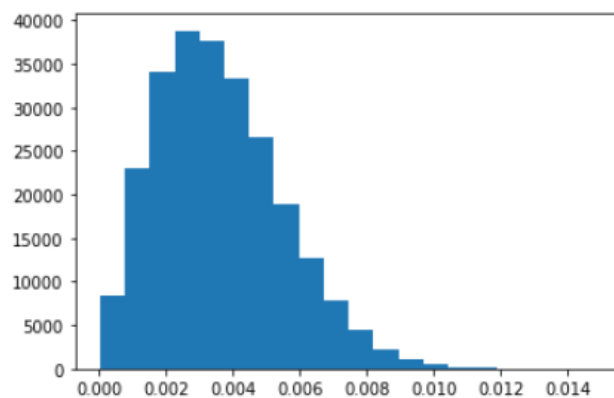


31. ábra Repedést tartalmazó CAD modell

A tesztre legkevésbé érzékeny csoport, a méretkülönbség (100 pont/250 000 pont) miatt a kisméretű és töredezett klaszterek nem láthatók a keretrendszer számára, és a teszt nem képes ilyen alacsony pontszámú klasztereket különálló felhőként kimutatni (32. ábra).

```
In [827]: print(min(dists))  
          print(max(dists))  
  
          plt.hist(dists, bins=20)  
          plt.show()
```

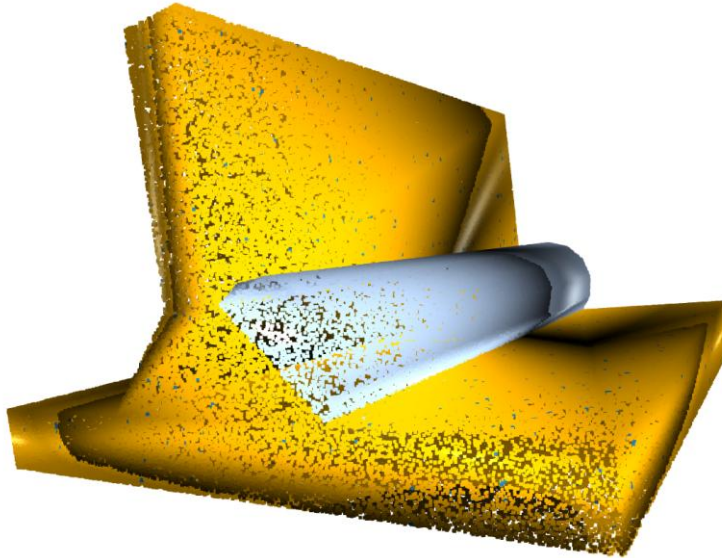
```
2.0711383669317408e-05  
0.014887107177512366
```



32. ábra Pontok távolságának (x-tengely) és azok számának (y- tengely) egyezése repedés hiba esetén

4.1.2 Túlzott konvexitás

A túlzott konvexitás hiba (a tökéletlenségek száma 503) a 33. ábrán látható.



33. ábra Túlzott konvexitást tartalmazó CAD modell

A PFH hisztogram alapján jól elkülönülő egységet képez a dudort képező klaszter (jobb oldalon, 34.ábra), távolsága számítható, hegesztési szabványba sorolható.

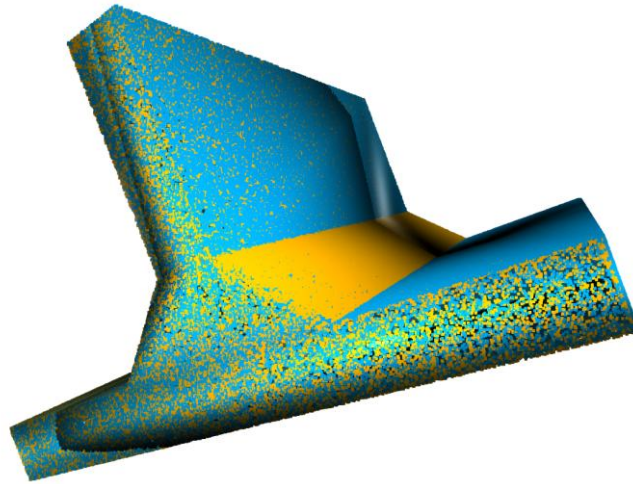


34. ábra Pontok távolságának (x-tengely) és azok számának (y- tengely) egyezése dudor hiba esetén

4.1.3 Tökéletlen forma esetén

Nem megfelelő (kisebb vagy nagyobb) gyökérméret – tökéletlenségek száma 5213, illetve 5214 (a fő hibák száma 500):

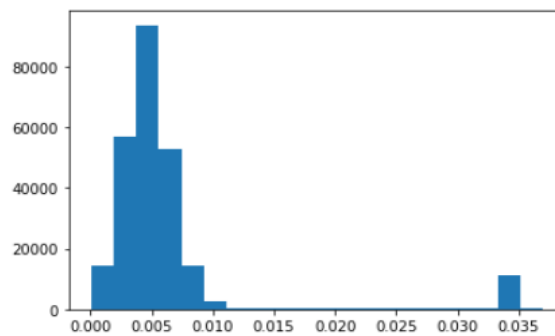
Nem megfelelő kisebb gyökérméret esetén a sárgával jelölt rész egyértelműen kimutatható az illesztés eredményeként (35. ábra) és a PFH analízis alapján (36. ábra) is:



35. ábra Tökéletlen forma, kisebb gyökérméret hiba esetén

```
In [409]: print(min(dists))  
          print(max(dists))  
  
          plt.hist(dists, bins=20)  
          plt.show()
```

```
5.236427003547475e-05  
0.036987488929621476
```



```
In [411]: print(max(dists))
```

```
0.036987488929621476
```

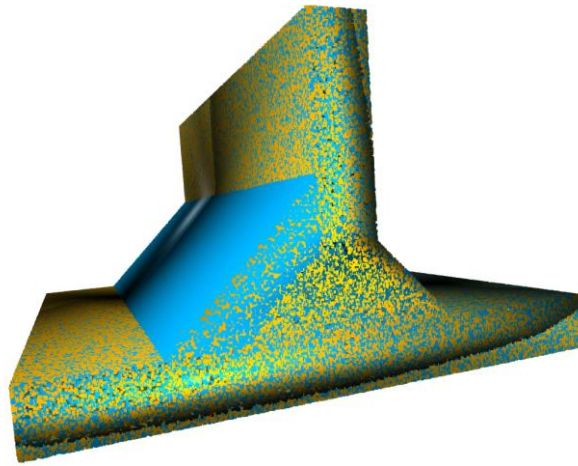
```
In [412]: max(dists)*25 # max távolság mm-ben
```

```
Out[412]: 0.9246872232405369
```

36. ábra Pontok távolságának (x-tengely) és azok számának (y- tengely) egyezése kisebb gyökér hiba ok esetén

A nagyjából azonos számú ponttal rendelkező klaszterek mindkét hibacsoporthoz eltérően reagálhatnak a tesztre, mert eltérő geometriai tulajdonságokkal rendelkeznek. A hibaklasztert képező felhő felületén található pontok száma 25 000 pont, a két csoport a klaszterpontoszámok tekintetében tehát elkülönül, de C és D kategóriában is (37. ábra) kimutatható.

Nem megfelelő nagyobb gyökérméret esetén:



37. ábra Tökéletlen forma, nagyobb gyökérméret hiba esetén

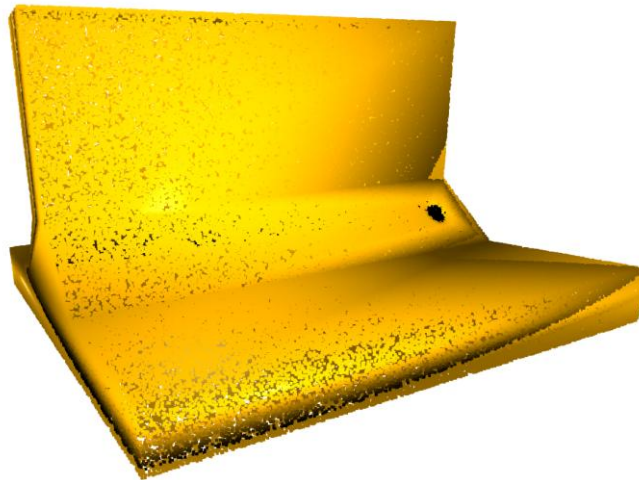
A PFH hisztogram alapján jól elkülönülő egységet képez (38. ábra) itt is a hibát képező klaszter (jobb oldalon), távolsága számítható, hegesztési szabványba sorolható.



38. ábra Pontok távolságának (x-tengely) és azok számának (y- tengely) egyezése nagyobb gyökér hiba ok esetén

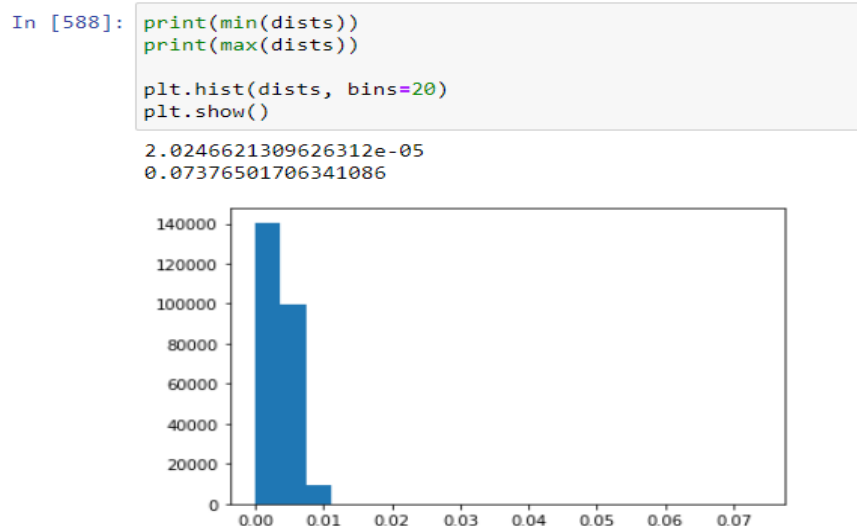
4.1.4 Végkráter

Végkráter hegesztési hiba (tökéletlenségek száma 5012) esetében hasonló a helyzet, amit tapasztaltam, mint repedés hiba esetében. A modellen megrajzolt hiba túl kicsi (39. ábra) a DBSCAN algoritmus számára.



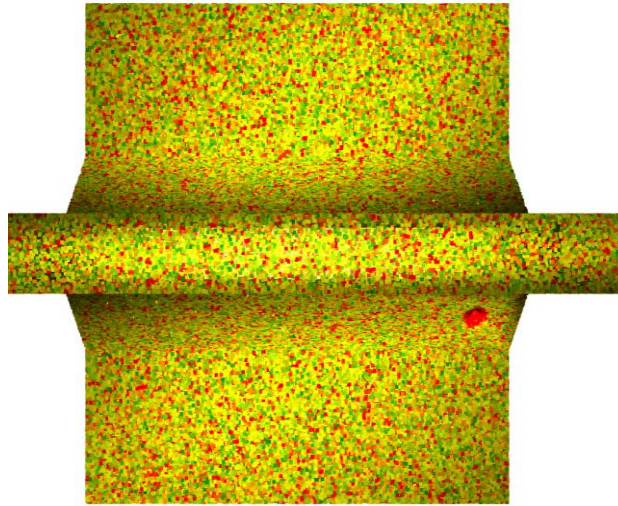
39. ábra Végkráter hiba

A PFH hisztogram alapján jól elkülönülő egységet nem képez (40. ábra) külön a klaszter, távolság így nem számítható ki:



40. ábra Végkráter hiba PFH diagrammja, egymásra illesztett pontok (x- tengely és pontok távolsága (y-tengely) viszonyában

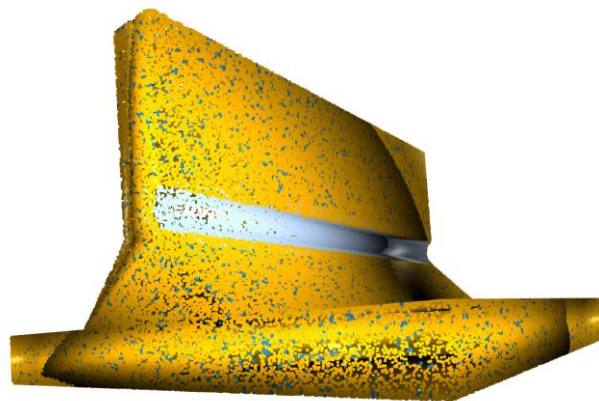
A hibát képező klaszter a nagysága alapján nem látható ugyan a keretrendszer számára, ám a keretrendszert lépéseit tartalmazó Colormap-vizualizáció (41. ábra) folyamata során a végkráter helye pirossal elkülönül.



41. ábra Végkráter hiba Colormap-vizualizáció alapján

4.1.5 Szakaszos alámetszés

Ezekben az esetekben (szélkiégés hiba, tökéletlenségek száma 2025) a referenciapontfelhővel arányosan a hibaklasztert képező felhő, teljes hosszan, negatív előjelű normálvektor koordinátákat tartalmaz (42. ábra). A generált hiba pontfelhője 5700-as nagyságú.



42. ábra Szélkiégés hiba

A PFH hisztogram alapján (43. ábra) látható, egy laposan elterülő sáv 0,038-as maximum távolság értékkel, a hibás klaszter tehát a keretrendszer által detektálható, hegesztési szabványba sorolható.

```

In [802]: print(min(dists))
          print(max(dists))

          plt.hist(dists, bins=20)
          plt.show()

1.9761886584384324e-05
0.038939755385699285

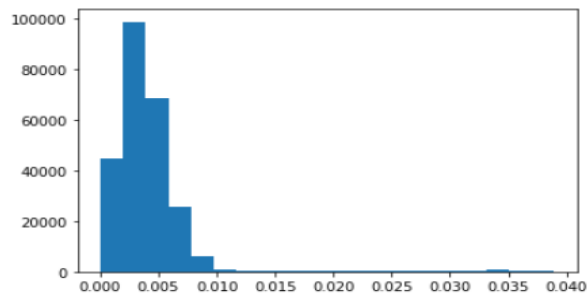
In [803]: print(max(dists))

0.038939755385699285

In [804]: max(dists)*25 # max távolság mm-ben

Out[804]: 0.9734938846424821

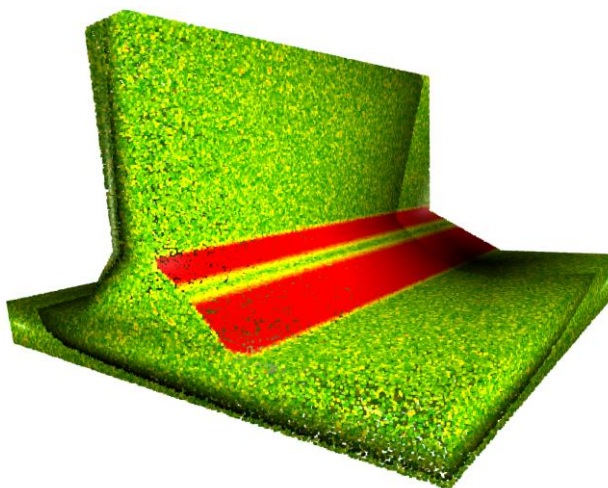
```



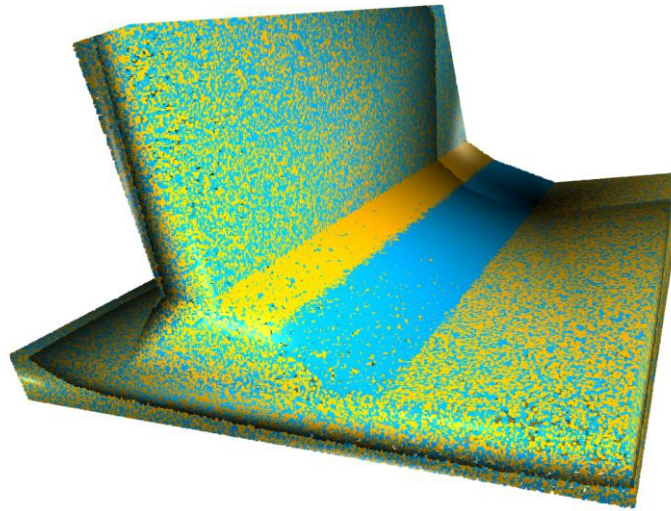
43. ábra Szélkiégés hiba PFH diagrammja, pontok távolsága és egymásra illesztésük viszonyában

4.1.6 A túlzott aszimmetria

A túlzott aszimmetria (a tökéletlenségek száma 512) hegesztési hiba csoport, alakjában és elhelyezkedésében hasonló a tökéletlen hibacsoporthoz tartozó hibák formáihoz ám a varrat hosszvonalában közepén van egy megtörés (44. és 45. ábra):



44. ábra Colormap vizualizáció, túlzott aszimmetria hiba



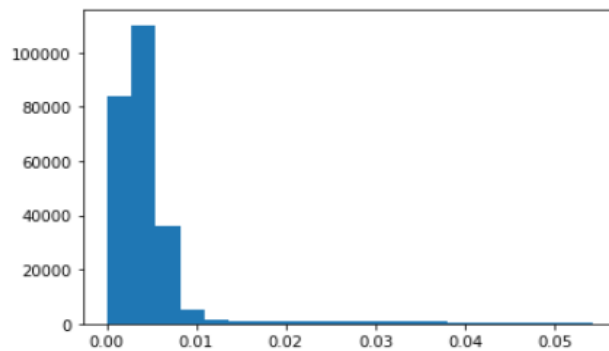
45. ábra Túlzott aszimmetria hiba

A PFH hisztogramja alapján viszont a szélkiégéshez kapcsolódó hisztogramhoz hasonlít. Egy laposan elterülő sáv két nagyságrendben (46. ábra). A hibás klaszter tehát a keretrendszer által detektálható, hegesztési szabványba sorolható.

```
In [674]: print(min(dists))
          print(max(dists))

          plt.hist(dists, bins=20)
          plt.show()

          5.0515246365271926e-05
          0.05434126356136117
```



```
In [676]: print(max(dists))

          0.05434126356136117
```

```
In [677]: max(dists)*25 # max távolság mm-ben

          Out[677]: 1.3585315890340293
```

46. ábra Aszimmetria hiba PFH diagrammja, pontok távolsága és egymásra illesztésük viszonyában

E kísérletek során összefoglalva a következőket tapasztaltuk, a sűrűség alapú klaszterezés nem tudja kimutatni a repedés- és krátervéghibákat azok kis méreteik miatt, ha a modellezett hiba mérete nem éri el a 200-as pontfelhő méretet, akkor (250 000-ból) nem lesz észlelhető az algoritmus számára.

A generált CAD modellek illesztésének legtávolabbi értékei 4,803 mm (B), 3,939 mm (C) és 2,936 mm (D) voltak. Az értékek megközelítik a szabványt (5-4-3 mm).

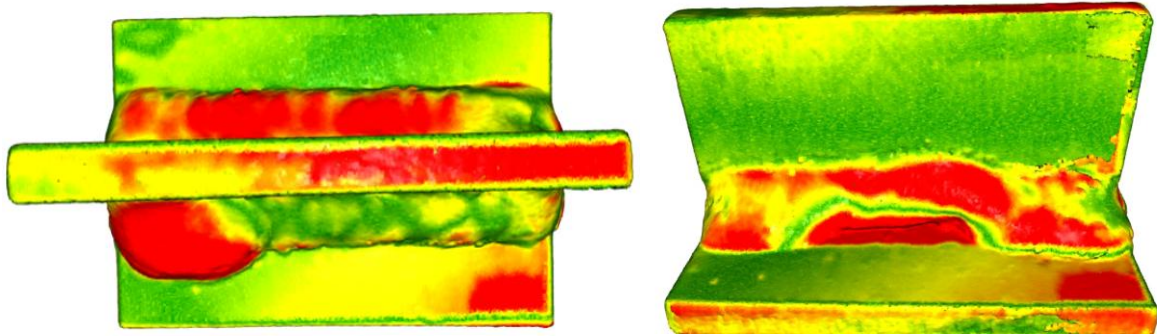
A generált hibák két kivétellel (repedés és végkráter) klaszterként is láthatóak, a Colormap vizualizáció vizsgálata alatt viszont a repedés és végkráter hibák is elkülönülnek piros színnel a környezetüktől.

4.2 Eredmények a sarokvarratok pontfelhői esetén

A korábban tapasztaltak szerint, a gyártáshoz szükséges a nagyfokú vágási pontosság, mert ennek hiányából adódó hibák könnyen megjelenhetnek, nem kívánt eltéréseket generálva az alkatrész pontfelhőinek egymásra illesztésénél. A hibás próbadarabra egy referencia munkadarabra (ellenőrzött legjobb munkadarabra) kerül illesztésre. Ahogy a 47. ábrán látható, a hegesztési varrat méretbeli különbségein kívül sajnos egyéb geometriai különbségek is megjelentek (munkadarab sarkai vagy a síkaktól való eltérések). Fontos megjegyezni, hogy a 47. ábrán a piros színek a referencia munkadarabtól távol eső pontokat jelölik, addig az 48. ábrán a piros csak a klaszterjel egyik színe.

Az eps (sugár) értéke, a sűrűségkarakterisztika ($15 \times pcr$) értékéből lett számítva. A klaszterenkénti pontok minimális száma ebben az esetben 100-ra lett beállítva, az adatkészletben lévő dimenziók száma és az adatokban lévő dimenziók száma alapján [157]. A távolságok felső 10%-át az illesztések csoportosítása után kapjuk meg. A klaszterek középpontjának lokalizációja és a méreteloszlás a hegesztési hibák típusaira jellemző tulajdonságokat mutat. Ahány klaszter észlelhető, annyi hibát azonosít a rendszer.

A tesztelési folyamat hasonló a generált munkadaraboknál leírtakhoz, annyi változással, hogy a DBSCAN folyamata után, nem csak a generált hiba jelenik meg, hanem minden eltérés is. Ezért a hibaklasztereket RMSE-értékük [158] szerint sorba rendeztem és címkéztem.



47. ábra Hegesztési hibák színhőmérséklet alapján: túlzott konvexitási (balra) és szakaszos alámetszési hiba (jobbra)

Az RMSE értékek és a súlypont geometriai adatai alapján tovább vizsgálható, hogy a hiba a monitorozás után (2. táblázat), alakra túlzott konvexitási hiba (megengedett érték felett), vagy időszakos alámetszési hiba (érték alatt).



48. ábra Túlzott konvexitási hiba a tömegközéppontokkal felülnézetből. A piros index kívül esik a tűrés (3 mm) B kategórián, a jelölőpontok színei a 49. ábrához illeszkednek.

A klaszter hegesztési hibára utalhat, ha a jelölés egy varraton helyezkedik el. Ebben az esetben döntést kell hozni, hogy a terméket meg kell-e javítani vagy le kell selejtezni.

2. táblázat A klaszterek kapcsolódó értékei (a sorok színei a 48. ábrához illeszkednek).

Klaszter ID	Pontok száma	RMSE	Hibás klaszterek súlypont értékei		
0	3824	3,165	127,278	-57,460	145,059
1	8433	2,089	160,334	-55,132	107,931
2	6058	1,742	114,276	-64,487	146,245
3	618	1,487	151,439	-61,352	104,103
4	3741	1,106	144,248	-31,916	121,838
5	172	0,832	130,808	-57,191	124,218

A felsorolandó klaszterek értékeit a 2. táblázat tartalmazza. Tipikus hegesztési hibák a túlzott konvexitási hibák, ahol a hibás klaszterek egyik tömegközéppontja a tűrésen túli, a hiba hegesztési vonal magasságánál nagyobb értékkel rendelkezik. ingyenes rész.

A tolerancia három kategóriát említ (B, C, D). Mint megjegyeztük, a tényleges méret egy esetben kívül esik a B tűréskategórián.

A felsorolásból kiolvasható, hogy a barna színű sorhoz kapcsolódik a munkadarabon a kritikus klaszter (barna pont – maximális RMSE érték). Attól kritikus az érték, hogy túlzott konvexitás (dudor) esetére a szabvány még 3 mm eltérést megenged, a detektált klaszter viszont a definiált határértéket átlépi. Illetve kiolvasható még, hogy a hosszú vörös klaszter – kiterjedése ellenére - nem haladja meg a tűrésértékeket. A többi jelölés az alkatrészen varraton kívül esik.

A kísérlet alatt a következőket tapasztaltam meg:

- A CAD modell képének összehasonlítása a hegesztett munkadarab képével a geometriai eltérések miatt nem szerencsés, mivel a hegesztési varrattal nem kapcsolatos eltérések is nagy számban jelennek meg. A pontatlan vágások okozta méretkülönbségek hatalmas klasztereket generálnak, így a vizsgálat lefutása után rangsorolásra kerülnek, ami kerülendő.
- A fényes, átlátszó felület vagy a teljesen fekete-fehér színű felület rontja a várt szkennelési eredményt. Ugyanakkor elengedhetetlen a környezeti előkészítés is (a projektor fényétől, nincs erősebb fény a helyiségben).
- A beállítás során ügyelni kell a vizsgálat finomhangolására, de ez erősen hardverfüggő. Ha több mint hat (60 foknál kisebb elforgatási szög) egyező képből keletkezik a 3D-s modell, a folyamat jelentősen lelassul, esetleg leáll.

4.3 Eredmények bemutatása és elemzése hegesztési kísérletből

A következő részben a vizuális vizsgálattal (3D szkennelés és érzékelés) kapott hibaképeket eredményei kerülnek bemutatásra. A képalkotó forrásokból származó eredményeket, a hegesztő robothoz kapcsolódó digitális-interface által gyűjtött információs csomaggal integráltam, keresve az összefüggéseket a villamos paraméterek és a hegesztési varratok alakja és mérete között.

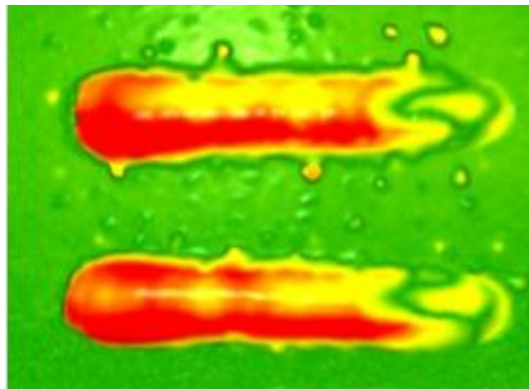
Ez lehetőséget teremt arra, hogy hiányzó paramétereket, a meglévők rendelkezése állása birtokában, meg lehessen jósolni. A digitális ikertechnológiát elősegítő virtuális robot rögzítette tehát a varrat keletkezése során létrejövő adatokat, amelyek felhasználásra kerültek.

A képfeldolgozó technológiák tesztkörnyezete, (berendezések, fényviszonyok) mind-mind befolyásolja a teszt pontosságát. Az illesztés Python programozási nyelven történik, a korábban említett OPEN3D keretrendszer támogatásával, amely az eltérések kiértékelésére szolgál. Az illesztés optimális geometriai alakzatokat igényel, ahol a váratlan eltérések/hibák már nem generálnak új vizsgálati módszereket, de az eltérések továbbra is kimutathatók.

4.3.1 Állandó hegesztési sebesség mellett, növekvő villamos paraméterek

A tényleges munkadarabokat a kutatási módszertan fejezetben (2. fejezet) említett részek közül választjuk ki. Az munkadarab-párosok a vízszentes kiválasztás elve szerint történt meg, vagyis azonos hegesztési sebességgel készültek el. Az 1-15 és a 15-30-as számú alkatrészek összehasonlítása kerül a következőkben bemutatásra.

Az egymásra illesztés eredmény esetén jól látható, hogy az áram és feszültség növekedés (49. ábra), varratméret növekedést is okoz (50. ábra), A pirossal jelölt részek a felhőpontok egymáshoz viszonyított 90 százaléknál nagyobb távolságokat jelzik az RGB (piros-zöld-kék) észlelési vizsgálat folyamatában.

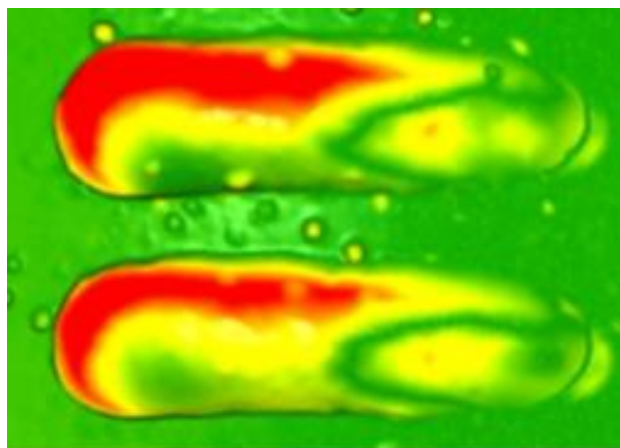


49. ábra 18V/40A és 21V/120A, hegesztési sebesség (30cm/perc)

A .csv file 6 oszlopban geometriai koordinátákat, 3 oszlopban villamos paramétereket tartalmaz (3. táblázat). Megfigyelhető, hogy a hegesztés során a villamos paraméterek változnak, és a kezdeti szintben is eltérés mutatkozik az előre beállított értékhez képest.

3. táblázat Állandó hegesztési sebességen gyűjtött adatok

Munkadarab_1			bemeneti értékek:			18V	40A	30 cm/perc
X	Y	Z	Rx	Ry	Rz	Feszültség	Áramerősség	Hegesztési sebesség
901,77	-674,63	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	18	40	30
901,68	-674,63	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	22,57	31,1	30
901,46	-674,63	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	14,95	54,4	30
901,35	-674,64	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	15,04	46,3	30
901,23	-674,65	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	15,31	41,9	30
901,14	-674,64	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	15,31	41,9	30
901,08	-674,65	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	15,81	43,4	30
900,95	-674,65	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	14,93	43,4	30
900,86	-674,65	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	14,93	43,4	30
900,73	-674,66	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	14,93	43,4	30
Munkadarab_15			bemeneti értékek:			21V	120A	30 cm/perc
X	Y	Z	Rx	Ry	Rz	Feszültség	Áramerősség	Hegesztési sebesség
896,12	-674,80	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,72	130,5	30
896,00	-674,81	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	0,04	0,1	30
895,90	-674,81	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	27,94	142,3	30
895,80	-674,82	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,42	137,4	30
895,68	-674,82	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	19,19	131,7	30
895,48	-674,83	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,44	141,5	30
895,36	-674,84	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	18,51	137,3	30
895,27	-674,83	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	19,27	132,3	30
895,17	-674,84	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	19,99	132,3	30
895,05	-674,83	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	19,59	133,9	30



50. ábra 21V/120A 40V/200A-vel, hegesztési sebesség (30 cm/perc).

A vízszintes kiválasztás szerinti következő páros (4. táblázat) az első csoport középső (15) és utolsó (30) eleme a hegesztési sebesség itt is állandó 30 cm/perc. A 51. ábrán jól látható, hogy a megnövekedett feszültség és áramerősség értékek a hegesztési varrat további megvastagodását okozzák. Szemrevételezéssel egyrészt könnyen észlelhető, hogy ahogy a varrat a végéhez közeledve (balról jobbra haladva), a hegesztőberendezés távolodása miatt a

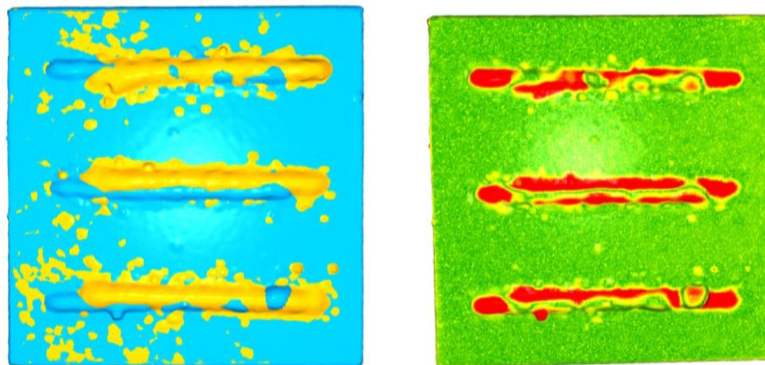
varrat elvékonyodik, másrészt a hegesztési varrat kezdeti szakaszában a vastagabb-varrat alak, a kezdeti feltöltés folyamatával magyarázható.

4. táblázat Állandó hegesztési sebességen gyűjtött adatok

Munkadarab_15			bemeneti értékek:			21V	120A	30 cm/perc
X	Y	Z	Rx	Ry	Rz	Feszültség	Áramerősség	Hegesztési sebesség
896,12	-674,80	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,72	130,5	30
896,00	-674,81	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	0,04	0,1	30
895,90	-674,81	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	27,94	142,3	30
895,80	-674,82	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,42	137,4	30
895,68	-674,82	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	19,19	131,7	30
895,48	-674,83	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	18,44	141,5	30
895,36	-674,84	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	18,51	137,3	30
895,27	-674,83	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	19,27	132,3	30
895,17	-674,84	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	19,99	132,3	30
895,05	-674,83	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	19,59	133,9	30
Munkadarab_30			bemeneti értékek:			40V	200A	30 cm/perc
901,46	-674,63	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,08	222,6	30
901,33	-674,64	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,08	222,6	30
901,17	-674,65	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	22,08	222,6	30
901,08	-674,65	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,08	222,6	30
900,97	-674,66	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	22,08	222,6	30
900,81	-674,66	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	22,37	221,1	30
900,69	-674,66	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,98	215,5	30
900,60	-674,66	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,47	218,7	30
900,43	-674,68	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	22,8	215,9	30
900,32	-674,67	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,03	213	30
900,21	-674,68	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,93	213,8	30

4.3.2 Állandó villamos paraméterek mellett, változó hegesztési sebesség

A függőleges kiválasztás szerint, elsőként a harmadik csoport (hegesztési sebesség 50 cm/perc) és ötödik csoport (hegesztési sebesség 70 cm/perc) első elemei (61 és 121-es munkadarabok) kerülnek egymásra illesztésre. A 51. ábra jól mutatja, hogy a megnövekedett hegesztési sebesség vékonyabb varratokat eredményez.



51. ábra 18V/40A és 50 cm/min, valamint 18V/40A és 70 cm/min illesztése, ICP (bal) és Colormap-el (jobb)

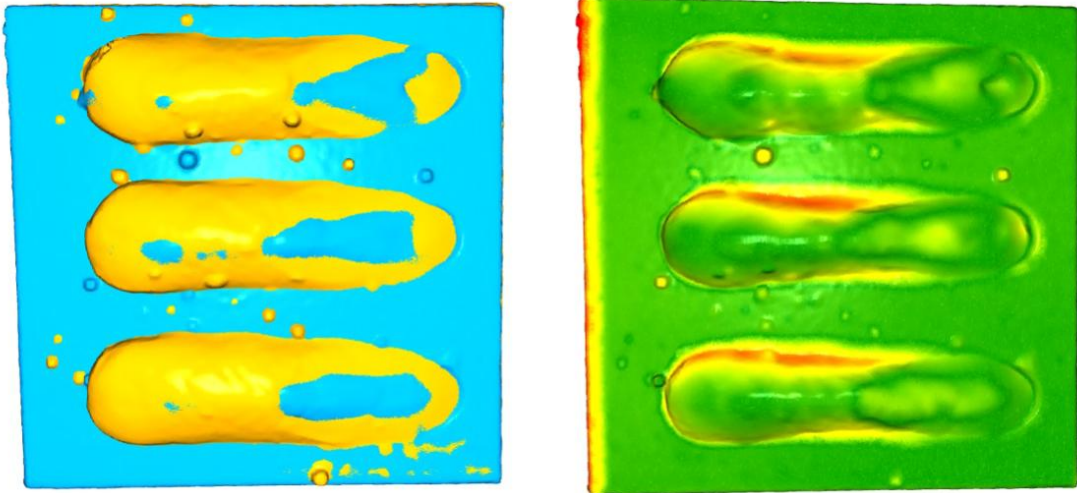
Bal oldalon az FGR+ICP utáni egymásra illesztett állapot, a jobb oldalon pedig az RGB észlelés eredménye látható. A hegesztési vonalak láthatóan szinte fedik egymást, de jobban megvizsgálva a kék varrat a vékonyabb, ez készült magasabb hegesztési sebességgel el.

A gyűjtött adatok -szemrevételezéssel hasonló formájú - különböző hegesztési sebesség és állandó villamos paraméterek esetén tehát a felső táblázat kapcsolódik a kék felhőhöz, az alsó rész a sárga felhőhöz (5. táblázat).

5. táblázat 50cm/perc és 70 cm/perc, 18V/40A paraméterekkel

Munkadarab_61				bemeneti értékek:			18V	40A	50 cm/perc
913,97	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	18	40	50	
913,93	-674,24	-53,67	0,45	-5,67	-1,77	48,63	30,9	50	
913,90	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	19,48	39,6	50	
913,88	-674,25	-53,67	0,45	-5,67	-1,77	20,05	38,7	50	
913,88	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	18,79	38,6	50	
913,78	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	17,94	38,8	50	
913,66	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	15,79	40,9	50	
913,50	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	16,08	40,8	50	
913,23	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	15,67	44,2	50	
913,03	-674,28	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	10,83	47,7	50	
912,97	-674,28	-53,67	0,45	-5,67	-1,77	15,61	47,7	50	
912,76	-674,29	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	15,12	47,8	50	
912,50	-674,30	-53,67	0,45	-5,67	-1,77	15,87	43,8	50	
Munkadarab_121				bemeneti értékek:			18V	40A	70 cm/perc
913,927	-674,244	-53,674	0,4472	-5,673	-1,7684	18	40	70	
913,755	-674,256	-53,67	0,4452	-5,673	-1,7667	24,2	31,2	70	
913,528	-674,257	-53,689	0,4462	-5,6719	-1,7672	15,32	39,1	70	
913,157	-674,272	-53,673	0,446	-5,673	-1,7676	21,65	39,1	70	
912,876	-674,283	-53,672	0,4463	-5,673	-1,768	21,65	39,1	70	
912,637	-674,288	-53,686	0,4461	-5,6724	-1,7671	22,09	38,3	70	
912,403	-674,301	-53,68	0,446	-5,6725	-1,7683	21,1	37,4	70	
912,124	-674,305	-53,677	0,4469	-5,6729	-1,768	19,86	37,5	70	
911,886	-674,318	-53,686	0,4468	-5,6719	-1,7685	18,43	38,2	70	
911,654	-674,328	-53,678	0,4456	-5,6724	-1,7675	16,13	42,1	70	
911,367	-674,333	-53,687	0,4464	-5,6719	-1,768	16,77	40	70	
911,143	-674,328	-53,679	0,4469	-5,6724	-1,7678	16,77	40	70	
910,863	-674,342	-53,678	0,4454	-5,6724	-1,7667	16,77	40	70	

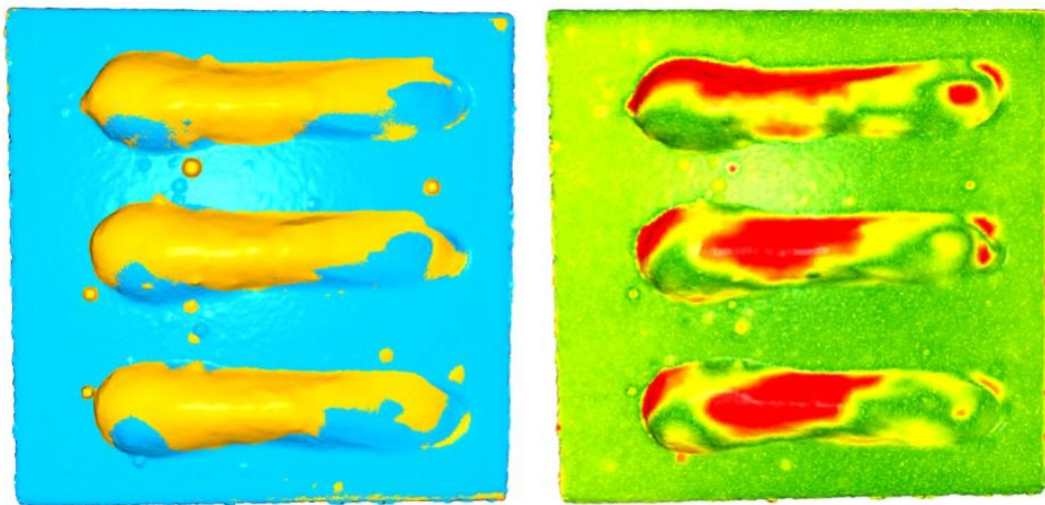
A következő felhő-páros, ami bemutatásra kerül a függőleges szemlélet szerint, az első csoport utolsó elemének (30. elem) és a harmadik csoport utolsó elemének (90. elem) átfedését mutatja (52. ábra). Itt első pillantásra már észrevehető, hogy a hegesztési varratok maximálisan kiszélesednek, hiszen itt a legnagyobbak a hegesztési paraméterek az egész kísérlet során.



52. ábra Mindkettő 40V/200A, de 30 cm/min és 50 cm/min

A hegesztő robot által rögzített adatokat egy logikailag hasonló párosnál kerül részletezésre.

A harmadik csoport utolsó eleme (90. elem) átfedésben van az ötödik csoport utolsó elemével (150. elem). Az illesztési eljárásokkal kapott eredményeket a 53. ábra mutatja be.



53. ábra Illesztés az állandó 40V/200A, 50 cm/min és 70 cm/min esetében

A kapcsoló -varrat keletkezése alatt rögzített – adatsor az 61. ábrán kerül bemutatásra.

6. táblázat 40V és 200 Amper de különböző hegesztési sebesség esetén

Munkadarab_150				bemeneti értékek:			40V	200A	70 cm/perc
912,55	-673,66	-39,01	0,48	-5,75	-1,71	23,8	200	70	
913,45	-673,99	-47,37	0,46	-5,71	-1,74	27,74	179,3	70	
914,02	-674,24	-53,35	0,45	-5,67	-1,77	27,74	214,6	70	
914,05	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,39	214,6	70	
914,05	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,57	215,5	70	
914,02	-674,25	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,09	215,5	70	
913,71	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,8	214,7	70	
913,48	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,18	214,3	70	
913,20	-674,27	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,75	214,1	70	
912,83	-674,29	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,59	-674,29	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,36	-674,30	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,08	-674,31	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
Munkadarab_90				bemeneti értékek:			40V	200A	50 cm/perc
908,80	-674,41	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,8	200	50	
908,47	-674,42	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	40,62	172,1	50	
908,37	-674,43	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	19,78	245,4	50	
908,28	-674,43	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	20,45	225,8	50	
907,75	-674,44	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,87	224,1	50	
907,58	-674,45	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,5	223	50	
907,38	-674,45	-53,67	0,45	-5,67	-1,77	21,71	221,5	50	
907,21	-674,46	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,53	220,6	50	
907,01	-674,47	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,56	216,5	50	
906,85	-674,47	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,75	215,3	50	
906,68	-674,48	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,13	217,2	50	
906,48	-674,48	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,82	219,5	50	
906,31	-674,49	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,82	219,5	50	

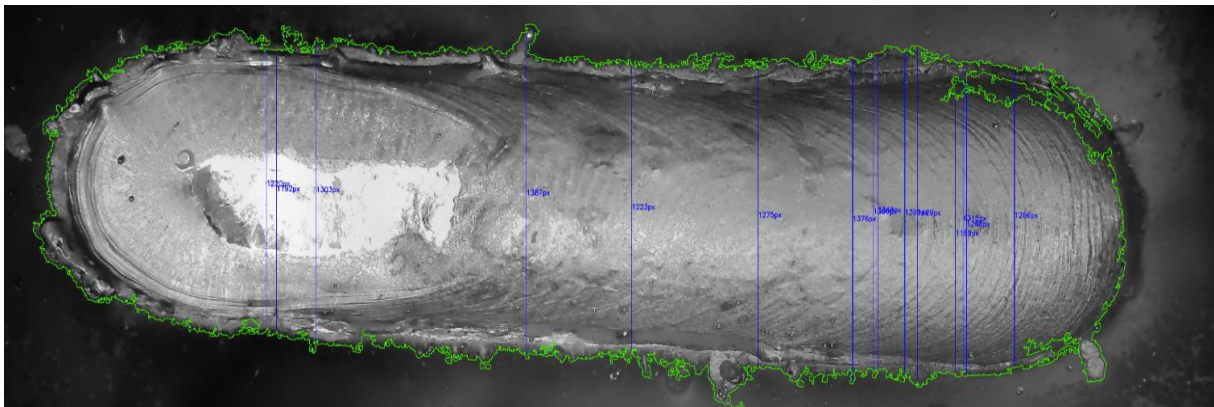
Következtetésként levonható általánosan is, hogy a kezdéskor megadott bemeneti paraméterek a valóságban eltérőek lehetnek. Feszültség esetében kevesebb, áramerősség esetében több a folyamatok alatt használt érték. Továbbá a varrat kezdésekor feszültség és amper ingás is megfigyelhető.

4.3.3 Szélesség meghatározása varrat kontúrjainak átlagolásával vagy becsléssel Élérzékelés rács segítségével

A hegesztési varratszélességek észleléséhez először tehát megfelelő minőségű bemenetre van szükség, azaz a jó minőségű képeket kell készíteni felülnézetből. Ezt követően az élérzékelés folyamatát zajszűréssel, valamint szűrkeszűrő és elmosódás-szűrés alkalmazásával folytatható. Befejezésül az élészlelés nagyságának meghatározása éldetekálás módszerével esetleg rács rávetítésével történik, majd a keletkező szélesség adatokat felhasználva becsléssel történhet.

Levezetve a varratszélességek nagyságának a számolásához, a varratszélesség arányosan számolható méretrács jellemző méreteivel számolva. 13*39-es rácsnál a rács hosszabbik oldalának nagysága 1mm, a rövidebb oldala a fent említett pixelarány miatt 0,33 mm, A 135-ös számú alkatrésznél az átlagos varratszélesség 3,55 mm.

A varratszélességek nagyságát levezetjük (54. ábra), amely arányos az átlapolott méretrács rácsméretével. 13*39-es rács esetén a rács nagyobbik oldalának hossza 1mm. A rács rövidebb oldalának hossza a pixelarány miatt 0,33 mm. A 135-ös alkatrésznél az átlagos varratszélesség így 3,55 mm



54. ábra A méretháló vetítése, varratszélesség leolvasásához

A rács vetítése során mért értékek a táblázat utolsó oszlopában az 1-15-30 és 61-75-90, illetve 121-135-150-es számú alkatrészek soraiban látható.

Varrat szélesség meghatározása becsléssel

A rács rávetítés által detektált varratszélességeket felhasználva, a korábban említett Machine Learning technológiát használó könyvtárakat használtam fel Python-Open3D környezetben. A rögzített csv file-okat felhasználva - a varrat szélességekkel kiegészítve és azokat bemenetként felhasználva - lineáris regresszió modellt alkalmazva.

A becsléssel kapott értékek a 40cm/perc és 60 cm/perc hegesztési sebességgel készült alkatrészek sorainál találhatóak.

7. táblázat Adattábla a mérési eredmények visszajelzésével.

Alkatrész száma	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rx [fok]	Ry [fok]	Rz [fok]	Hegesztési sebesség [cm/perc]	Feszültség [Volt]	Áramerősség [Amper]	Varratszélesség [mm]
1	914.052	-674.246	-53.679	0.4462	-5.6725	-1.7677	30	18	40	2.9
15	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	30	21	120	6.8
30	908.647	-674.419	-53.686	0.4454	-5.6719	-1.7666	30	23.8	200	8.9
31	914.052	-674.246	-53.679	0.4462	-5.6725	-1.7677	40	18	40	becsült: 2,77
45	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	40	21	120	becsült: 5,8
60	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	40	23,8	200	becsült: 8,3
61	908.647	-674.419	-53.686	0.4454	-5.6719	-1.7666	50	18	40	2,65
75	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	50	21	120	4,8
90	908.647	-674.419	-53.686	0.4454	-5.6719	-1.7666	50	23,8	200	7,7
91	914.052	-674.246	-53.679	0.4462	-5.6725	-1.7677	60	18	40	becsült: 2,52
105	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	60	21	120	becsült: 3,6
120	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	60	23,8	200	becsült: 7,75
121	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	70	18	40	2,4
135	908.647	-674.419	-53.686	0.4454	-5.6719	-1.7666	70	21	120	3,55
150	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	70	23,8	200	7,8

Ha a hegesztési sebesség 30 cm/perc (21V és 120A), a méretrács leolvasása szerint a hegesztési szélesség 6,8 mm nagyságú. A hegesztési sebességet növelve a becsült értéket figyelembe (63. ábra) véve a varrat szélesség csökkenni fog 5,8 mm lesz. Az előrejelzést a tényleges mérésekkel összehasonlítva csak közelítőleg azonosak, mivel a varratokról készült felvételek alapján a varratok szélei nem mindig egyértelműsíthetőek.

Az első harmadik és ötödik csoportokat tanító modellként használva, a második és negyedik csoport kapcsoló értékei becslésre kerültek.

Összefoglalva tehát, becslés segítségével kimutatható az elektromos paraméterek növelésének hatása a varratokon. Növelve a bemeneti Volt/Amper értékek varratnövekedést tapasztalhatunk, ha a hegesztési sebességet állandó értéken tartjuk.

Mivel ez a kísérleti fejlesztés csak felületi varratokat tartalmaz, ezért a szabványnak való megfeleltetése nem olyan egyértelmű, mint például a sarokvarratok esetében, ahol a hegesztési eltérések a hat fő hegesztési hibacsoport szerint osztályozhatók.

A mintadarabok bemutatása miatt alkalmazott hőkezelő folyamatok során, az utólagos hőkezelés jelentős növekedést eredményezett a mechanikai ellenállásban. A maximális húzóerő mérései alapján a következő eredmények.

5. Diskusszió

A kutatásom kezdetén a munkadarabok pontfelhőinek összehasonlításával foglalkoztam, azok pontfelhőinek sűrűség alapú klaszterezésével azonosítottam az eltéréseket. Az eredmények alapján a módszer hatékonyan képes azonosítani és csoportosítani a hegesztési hibák nagy részét a pontfelhők pontjai elhelyezkedése alapján. Bizonyos hegesztési hibákat viszont (pl. repedéseket) különálló klaszterként korlátozottan képes csak azonosítani.

A kutatási kérdések és célok fényében az eredmények a következőkben leírtak szerint értelmezhetők. Az eredmények azt mutatják, hogy a sűrűség alapú klaszterezés (DBSCAN) segítségével hatékonyan képes azonosítani a hegesztési hibákat a keretrendszer, kivéve a repedéseket, amelyek nem különülnek el különálló klaszterként. Ez az algoritmus hatékonyan kezelte a zajos adatokat és különböző alakú klasztereket azonosított.

A kutatásom során bemutatott módszer sikeresen osztályozza a hegesztési hibákat a CAD modellek alapján, és a pontfelhők feldolgozásával lehetővé teszi a hibák vizualizálását

Korábbi kutatások, mint például a Kalman szűrő alkalmazása a hegesztési varratok nyomon követésére, szintén sikeresen alkalmaztak képfeldolgozási algoritmusokat a hegesztési hibák azonosítására, fontos megjegyezni, hogy ezek a korábbi módszerek nem mindig voltak képesek kezelni a zajos adatokat olyan hatékonyan, mint a DBSCAN.

A DBSCAN algoritmus mellett a PPFH (Fast Point Feature Histograms) algoritmust is alkalmaztam a pontfelhők jellemzőinek kiszámítására és összehasonlítására. Ezek az algoritmusok nagy pontosságot értek el, de gyakran nagy számítási kapacitást igényeltek.

Specifikus korlátokat tekintve a DBSCAN algoritmus alkalmazott bemeneti paramétereinek miatt az 0,5 mm x 0,2 mm x 0,1 mm méretű hegesztési hibák (pl. repedések) nem detektálhatók, mivel a hibaklaszter felületén kevesebb mint 100 pont generálódik.

Korlátokat tekintve a 3D szkennelési technológia eredménytermékeinek minősége erősen függ a fizikai körülményektől, mint például a beállítások, a kamera pozíciója, a fényviszonyok és a tárgy felületének minősége. A munkadarabok fényes, vagy fekete-fehér felületei rontják a szkennelési eredményt.

A kifejlesztett keretrendszer elsődleges bemenetét képező pontfelhők minősége valóban kulcsfontosságú, mivel ezek határozzák meg a további feldolgozás és elemzés pontosságát.

A pontfelhők minősége nagymértékben függ a fényviszonyoktól, a túl erős vagy túl gyenge megvilágítás torzíthatja a szkennelési eredményeket. A szkennelés előkészítése során alkalmazott beállítások, mint például a szkennelési felbontás és a szkennelési sebesség, szintén befolyásolják a pontfelhők minőségét. A megfelelő beállítások kiválasztása elengedhetetlen a pontos eredmények eléréséhez. A kamera helyzete és szöge a szkennelési folyamat során kritikus szerepet játszik. A kamera távolsága a szkennelendő tárgytól, valamint a kamera és a projektor szöge a vízszinteshez képest, mind befolyásolják a pontfelhők minőségét. A helytelen beállítások torzítást és pontatlanságot eredményezhetnek.

Hegesztési hibák osztályozása esetén előrelépés a korábbi kutatásokhoz képest, hogy a hegesztési hibák osztályozása és vizualizálása gyakran manuális folyamat volt, amely időigényes és kevésbé pontos lehetett.

Kutatásom folytatásaként digitális interface alkalmazva, a hegesztési robotok adatainak valós idejű gyűjtése és vizualizálása sikeresen megvalósításra került.

Az adatgyűjtés során a nagy mennyiségű adat kezelése kihívást jelentett. Az adatok gyors növekedése miatt finomhangolásra volt szükség, hogy az adatgyűjtés hatékonyabb legyen.

A hegesztőrobot és a hegesztési áramforrás közötti kommunikáció korlátozott volt a rendelkezésre álló hardvereszközök miatt. Az operációs rendszer socket programozási felülete a .NET keretrendszer korlátozásai miatt nem közvetlenül beágyazható a kommunikációs szoftverkönyvtárhoz.

A kutatás során csak korlátozott számú hegesztési próbát végeztünk, ami befolyásolhatja az eredmények általánosíthatóságát. Illetve fontos, hogy a visszacsatolási mechanizmus hatékonysága nagymértékben függ az összegyűjtött adatok minőségétől. A zajos vagy hiányos adatok pontatlan előrejelzéseket eredményezhetnek.

A különböző érzékelési algoritmusok (Sobel, Prewitt, Canny) alkalmazása lehetőséget teremt a varratszélességek bemenetként való beépítéséhez. Az érzékelési folyamat több lépésből áll, beleértve a zajszűrést, a szürkeárnyalatos szűrőt és a homályosítást.

Az érzékelési folyamat több lépésből áll, beleértve a zajszűrést, a szürkeárnyalatos szűrőt és a homályosítást. Korábbi kutatásokban is alkalmaztak érzékelési algoritmusokat a hegesztési varratok vizsgálatára, azonban ezek gyakran nem voltak képesek valós idejű adatokat feldolgozni és integrálni a digitális iker technológiába.

Korábbi kutatások, mint például a Kalman szűrő alkalmazása a hegesztési varratok nyomon követésére, szintén sikeresen alkalmaztak képfeldolgozási algoritmusokat a hegesztési hibák azonosítására. Azonban ezek a módszerek nem mindig voltak képesek kezelni a valós idejű adatokat olyan hatékonyan, mint a mi keretrendszerünk.

Olyan gépi tanulási algoritmusok, mint például a konvolúciós neurális hálózatok (CNN), szintén sikeresen alkalmaztak hegesztési hibák azonosítására, viszont a hegesztési paraméterek optimalizálása gyakran manuális folyamat volt, amely időigényes és kevésbé pontos lehetett.

Kutatásom folytatásaként a 3D nyomtatott termékeken, utólagos hőkezelési eljárásokat hajtottam végre. Az eredmények azt mutatják, hogy a hőkezelés jelentős mértékben növeli a mechanikai ellenállást, ellenben jelentős geometriai torzulások léphetnek fel, különösen a vékony falú minták esetében.

A hőkezelési folyamat során a hőmérséklet és az időtartam optimalizálása kihívást jelentett. A túl hosszú hőkezelés geometriai torzulást okozhat, míg a túl rövid hőkezelés nem eredményez jelentős mechanikai ellenállás növekedést.

Összefoglalva a kutatásom eredményei azt mutatják, hogy a bemutatott eszköz (3D szkennerek) hatékony támogatást adhat a hegesztési hibák azonosítására és osztályozására, különösen a sűrűség alapú klaszterezés alkalmazásával. Azonban további kutatások szükségesek a repedések és más, nehezen azonosítható hibák pontosabb detektálásához. Pontfelhők egymásra illesztésével kapcsolatosan a kutatásom eredményei azt mutatják, hogy a DBSCAN algoritmus hatékony eszköz a különböző alakú klaszterek azonosításában.

Adatintegráció tekintetében az eredmények alapján a keretrendszerünk lehetővé teszi a hegesztési folyamatok felügyeletét, ami hozzájárul a termelékenység és a termékminőség javításához. A hegesztési robot adatainak felhasználásával, Machine Learning technológiák alkalmazására nyílik lehetőség, a paraméter becslés automatizálhatóvá válik.

6. Következtetések

6.1 A kutatásom megállapításai pontfelhőillesztéses vizsgálatokkal kapcsolatosan

A kutatás során kidolgozott keretrendszer hatékonyan képes azonosítani a hegesztési hibákat 3D szkennert adatok felhasználásával. A módszer a pontfelhők összehasonlításával és sűrűség alapú klaszterezéssel azonosítja az eltéréseket. A hegesztési hibákat az ISO 5817:2014 szabvány alapján kerültek osztályozásra. A módszer képes volt azonosítani és csoportosítani az eltéréseket a különböző pontok helyzete alapján.

Fontos megjegyezni, hogy a módszer nem képes különálló klaszterként azonosítani a repedésekkel kapcsolatos hibákat, mivel ezek túl kicsik ahhoz, hogy a sűrűség alapú klaszterezés során elkülönüljenek és az algoritmus számára láthatóvá váljanak.

A kidolgozott keretrendszer alkalmazható mind generált, mind valós fizikai munkadarabokon, és lehetőséget biztosít a hegesztési hibák automatikus azonosítására és osztályozására.

A kidolgozott keretrendszer jelentősen csökkentheti az emberi ellenőrzés szükségességét és növelheti a folyamat hatékonyságát. Továbbá a 3D szkennert adatok és a sűrűség alapú klaszterezés alkalmazása pontosabb és megbízhatóbb hibadetektálást tesz lehetővé, ami javítja a végtermék minőségét.

Képzés és oktatás tekintetében az eredmények felhasználhatók a hegesztési képzésben és oktatásban, mivel a hibák azonosítása és osztályozása alapján pontos visszajelzést kaphatnak a munkájuk minőségéről. A 3D szkennert adatok és a klaszterezési eredmények vizualizálása segíthet a hegesztőknek jobban megérteni a hibák okait és javítani a technikájukat.

A hegesztési hibák pontosabb detektálása érdekében érdemes több módszert kombinálni, például a gépi látás és a konvolúciós neurális hálózatok alkalmazását.

6.2 Adatfúzióval kapcsolatos megállapítások

A kutatás során a digitális interfész felhasználása, lehetővé tette a hegesztési robot adatainak valós idejű gyűjtését és vizualizálását. Ez magában foglalja a hegesztési robot mozgásának és a hegesztési paraméterek (áram, feszültség, hegesztési sebesség) valós idejű megfigyelését és rögzítését is.

A kutatás ezen részének a célja a digitális iker rendszer előkészítése volt, amely becsléshez Machine Learning technológiát használ, ami alapot teremt a digitális iker rendszer jövőbeli fejlesztéséhez

A különböző érzékelési algoritmusokat (Sobel, Prewitt, Canny) alkalmaztam a hegesztési varratok szélességének meghatározására. Az érzékelési folyamat több lépésből állt, beleértve a zajszűrést, a szürkeárnyalatos szűrőt és a homályosítást is, ami kulcsfontosságú, de nem mindig vezet eredményhez, ezért méretrács rávetítéséből származó eredmények integráltam a becsült értékek eléréséhez.

A szimulációs modellekbe való integrálás, lehetővé teszi tehát a gyártási folyamatok alatt és után történő becslést. Lineáris regresszió modellt alkalmazva a hegesztési paraméterek előre jelezhetőek, amelyek segítenek a gyártási folyamatok folyamatos fejlesztésébe.

A hegesztőrobot és a hegesztési áramforrás közötti kommunikáció javítása érdekében további hardverfejlesztések szükségesek. Az új kommunikációs protokollok és eszközök alkalmazása, később lehetővé teszi a hatékonyabb adatátvitelt. Az új algoritmusok és technológiák alkalmazása lehetővé teszi a gyorsabb és pontosabb adatfeldolgozást.

6.3 Kutatás főbb megállapításai az utólagos hőkezelésekkel kapcsolatosan

A bemutatott keretrendszer, amely digitális adatgyűjtést támogat, hatékony eszköz lehet a hegesztési varratok szélességének valós idejű meghatározására és a digitális iker technológia előkészítésére. Az eredmények alapján a keretrendszer lehetővé teszi a hegesztési folyamatok optimalizálását, Machine Learning technológia támogatásával az előrejelzést, így a gyártási folyamatok hatékonyságának növelve, hozzájárul a termelékenység és a termékminőség javításához.

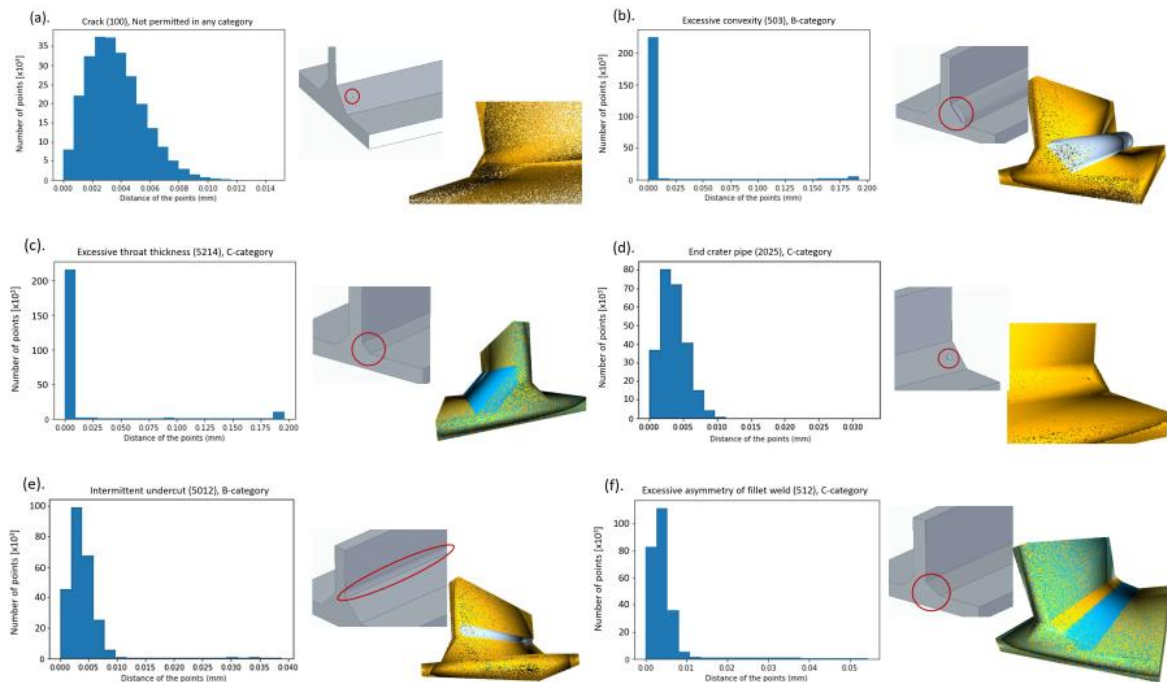
Az eredmények azt mutatják, hogy a hőkezelés jelentős mértékben növeli a mechanikai ellenállást, de felületi torzulásokat is okoz. Vagyis a hőkezelés során jelentős geometriai torzulások léphetnek fel, különösen a vékony falú minták esetében. Az acéllemezek használata segített a minták laposságának megőrzésében, de ez nem minden geometria esetében alkalmazható. A kutatás során használt módszer minimális költségnövekedéssel jár, mivel a hőkezelés a 3D nyomtató ágyán történik, így nincs szükség további berendezésekre vagy kemencére. Ez lehetővé teszi a kis- és középvállalkozások számára, hogy költséghatékonyan javítsák a 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságait.

7. Tézispontok

A kutatásom során négy fő publikációra támaszkodom. A publikációim a hegesztési hibák vizsgálatának kiterjesztéséről, a varratok keletkezése alatt rögzített adatok felhasználásáról és a varratokról készült 2D és 3D technológiával gyűjtött adatok integrálásával kapcsolatosak.

7.1 A hegesztési hibákat tartalmazó munkadarabok CAD-alapú pontfelhői leírhatóak és azonosíthatóak a pontokat leíró PFH hisztogram analízis támogatásával

Az első referált publikációm a **3D scanning and model error distribution-based characterisation of welding defects** (HUNGARIAN JOURNAL OF INDUSTRY AND CHEMISTRY, Hegedűs-Kuti János, Szőlősi József, Varga Dániel, Farkas Gábor, Ruppert Tamás, Abonyi János és Andó Mátyás; DOI: 10.33927/hjic-2021-13) címmel jelent meg, amely a hegesztési munkadarabok pontfelhőinek egymásra illesztése után kapott eltérésekre fókuszál PFH analízis alkalmazásával (55. ábra).



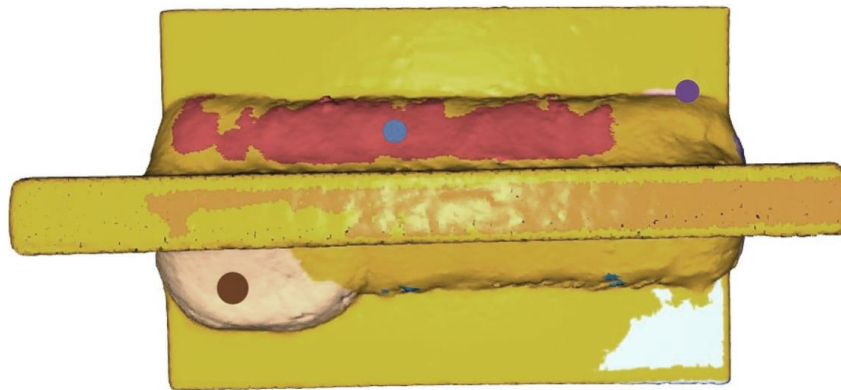
55. ábra CAD-felhők egymásra illesztés PFH analízis alapján

7.1 (EN) CAD-based point clouds of workpieces containing welding defects can be described and identified with the support of PFH histogram analysis describing the points

7.2 A hegesztési hibák hatékonyan azonosíthatók a hibaklaszterek tömegközéppontjai, a felhők pontszámai és a felhő alakzata alapján, DBSCAN algoritmus alkalmazásával

A második publikáció egy keretrendszert ír le az első cikkem folytatásaként, a hegesztési hibák 3D szkennerek adatainak alapján történő felismerésére, és az eltérések azonosítására.

A 3D Scanner-Based Identification of Welding Defects - Clustering the Results of Point Cloud Alignment (Hegedűs-Kuti János, Szőlősi József, Varga Dániel, Abonyi János, Andó Máttyás és Ruppert Tamás; MDPI Sensors, Q1) című publikációm tehát a hegesztési hibák 3D szkennerek alapú azonosításának keretrendszerét írja le. A tanulmány a pontfelhő összehasonlítására és az eltérések azonosítására sűrűség alapú klaszterezést alkalmaz (56. ábra). Az ISO 5817:2014 szabványban meghatározott hat hegesztési eltérést értékelték, és a módszer négy eltérést sikeresen azonosított.



56. ábra Hegesztési hibák klaszteres tömegközépponttal

8. táblázat Klaszterek nagysága, helye és az etalontól való eltérései

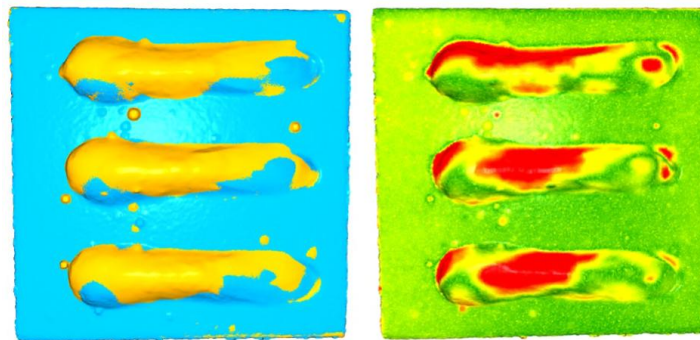
Klaszter ID	Pontok száma	RMSE	Hibás klaszterek súlypont értékei		
0	3824	3,165	127,278	-57,460	145,059
1	8433	2,089	160,334	-55,132	107,931
2	6058	1,742	114,276	-64,487	146,245
3	618	1,487	151,439	-61,352	104,103
4	3741	1,106	144,248	-31,916	121,838
5	172	0,832	130,808	-57,191	124,218

7.2 (EN) Welding defects can be effectively identified based on the centers of mass of defect clusters, cloud scores, and cloud shape using the DBSCAN algorithm.

7.3 A hegesztési varratok létrejöttének bemenetét képező hegesztési paraméterek (feszültség, áramerősség, hegesztési sebesség), a varrat alakjára befolyást gyakorló hatásként detektálhatóak a varratokról készült pontfelhők konzisztens követésével, azok egymásra illesztésének folyamata alatt

A harmadik publikációm az **Extending the welding seams detection as preparation towards the digital twin technology** (Hegedűs-Kuti János, Szőlősi József, Birosz Márton Tamás,

Csobán Attila, Popa-Müller Izolda, és Andó Mátyás; IET Collaborative Intelligent Manufacturing, Q1) címmel jelent meg és a hegesztési hibák vizsgálatának kiterjesztésével foglalkozik. A hibák észleléséről és azonosításáról szól, amely bemutatja hogyan lehet a hegesztési folyamat során gyűjtött adatokat integrálni a képfeldolgozó alkalmazások eredménytermékeivel. Az egymásra illesztett pontfelhőkön (57. ábra) nyomon követhető a villamos paraméterek hatása (9. táblázat).



57. ábra Illesztés az állandó 40V/200A, 50 cm/min és 70 cm/min esetében

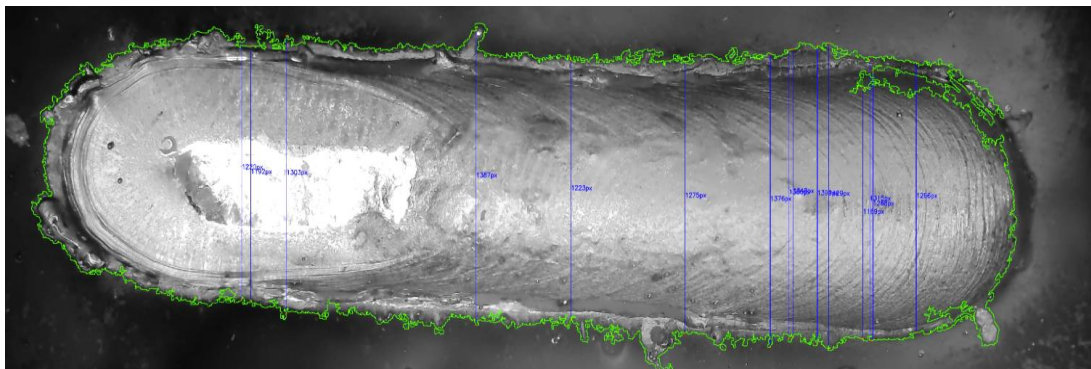
9. táblázat 40V és 200 Amper de különböző hegesztési sebesség esetén

Munkadarab_150	bemeneti értékek:						40V	200A	70 cm/perc
912,55	-673,66	-39,01	0,48	-5,75	-1,71	23,8	200	70	
913,45	-673,99	-47,37	0,46	-5,71	-1,74	27,74	179,3	70	
914,02	-674,24	-53,35	0,45	-5,67	-1,77	27,74	214,6	70	
914,05	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,39	214,6	70	
914,05	-674,25	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	21,57	215,5	70	
914,02	-674,25	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,09	215,5	70	
913,71	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,8	214,7	70	
913,48	-674,26	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,18	214,3	70	
913,20	-674,27	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	22,75	214,1	70	
912,83	-674,29	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,59	-674,29	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,36	-674,30	-53,69	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	
912,08	-674,31	-53,68	0,45	-5,67	-1,77	23,62	216,2	70	

7.3 (EN) The welding parameters (voltage, current, welding speed) that are the input to the formation of weld seams can be detected as an effect that influences the shape of the weld by consistently tracking the point clouds made of the welds during their alignment process.

7.4 Machine Learning technológia támogatásával a hegesztési varratra jellemző geometriai adatok megbecsülhetők, a korábban elvégzett más hegesztési paraméterekkel folytatott hegesztési kísérletek alapján

Az előző tézisben említett harmadik publikációm (**Extending the welding seams detection as preparation towards the digital twin technology**), a hegesztési hibák vizsgálatának kiterjesztésével is foglalkozik. A hibák észleléséről és azonosításáról szól, amely bemutatja hogyan lehet a hegesztési folyamat során gyűjtött adatokat integrálni a képfeldolgozó 2D alkalmazások eredménytermékeivel (58. ábra), a varratszélességre vonatkozó hiányzó adatokat becsléssel megadva (10. táblázat).



58. ábra Éldetektálás, képfeldolgozó algoritmusok folyamata után.

10. táblázat Varratszélesség becsléssel

Alkatrész száma	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rx [fok]	Ry [fok]	Rz [fok]	Hegesztési sebesség [cm/perc]	Feszültség [Volt]	Áramerősség [Amper]	Varratszélesség [mm]
1	914.052	-674.246	-53.679	0.4462	-5.6725	-1.7677	30	18	40	2.9
15	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	30	21	120	6.8
30	908.647	-674.419	-53.686	0.4454	-5.6719	-1.7666	30	23.8	200	8.9
31	914.052	-674.246	-53.679	0.4462	-5.6725	-1.7677	40	18	40	becsült: 2,77
45	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	40	21	120	becsült: 5,8
60	912.608	-674.288	-53.687	0.4471	-5.6723	-1.7678	40	23,8	200	becsült: 8,3

7.4 (EN) With the support of Machine Learning technology, the geometric data characteristic of the weld seam can be estimated based on previously performed welding experiments with other welding parameters.

8. Publikációs lista, egyéb tudományos aktivitások

8.1 Tézisponthoz nem kapcsolódó további publikációk

8.1.1 Performance of Cell Phone Controlled Model Vehicle

Kutatásom kezdetén az additív gyártással kapcsolatosan jelent meg a **Performance of Cell Phone Controlled Model Vehicle** című publikációm (Mérnöki és Informatikai Megoldások, DOI: 10.37775/eis.2020.2.2).

A projekt célja egy olyan autómódel megalkotása volt - additív technológiával -, amely vezeték nélküli kommunikáción keresztül kapcsolódik egy telefonhoz. Az egységek nyomtatásához PLA-t használtam anyagként. A modellautó össztömege az elektronikus alkatrészekkel együtt 690 gramm. Az energiafogyasztást és a menettulajdonságokat adott körülmények között mérték.

8.1.2 Real-time data visualization of welding robot data and preparation for future of digital twin system (Scientific Reports, D1, DOI: 10.1038/s41598-024-59146-9)

A virtuális robot megalkotása után robotvizualizáció és adatgyűjtés valósult meg. A kisszámú hegesztési kísérlet, amelyet a hegesztő robot és a virtuális robot egyszerre végez el, a mozgásról és hegesztési paramétereiről adatrögzítés történt. Ez magában foglalja a geometriai koordinátákat (x, y, z) és a forgási értékeket (Rx, Ry, Rz), valamint a hegesztés során használt áramerősséget és feszültséget is.

8.1.3 Lazy thermal annealing of material extrusion-based 3D-printed PLA specimens, Springer, Progress in Additive Manufacturing, Q1, DOI10.1007/s40964-024-00732-8

A 3D scanner által generált hegesztési sarokvarratok pontfelhőinek próbanyomtatására fókuszál. Az anyagextrudáláson (ME) alapuló 3D nyomtatási eljárás lehetőséget biztosít, az elkészült alkatrészek gyors prototípus-készítésre. A reprezentációs célokra elvégzett nyomtatás bemutatásra került oktatási területen az egyetemi előadásokon, valamint gyártáslabor oktatási körülményei között is.

8.2 Konferenciákon való részvétel

8.2.1 Manufacturing / Gyártás Konferencia, Veszprém

Előadás címe: **Ipari rendszererk IT-alapú integrációja** (HJIC publikációhoz kapcsolódóan)

Helye és ideje: Veszprém, 2021 október 29-30

8.2.2 Gyártás Konferencia Szombathely

Előadás címe: **Ipari rendszererk (3D szkennerek) IT-alapú integrációja** (Sensors publikációhoz kapcsolódóan)

Helye és ideje: Veszprém, 2022 december 1.

8.2.3 PhD hallgatók anyagtudományi napja XXIV /Materials science day XXIV of PhD students

Előadás címe: **A hegesztési varratok vizsgálatának kiterjesztése, lépések a digitális ikertechnológia felé** (Scientific Reports publikációhoz kapcsolódóan)

Helye és ideje: Veszprém, Pannon Egyetem, Ideje: 2024. november 18.

8.3 Könyv megjelenés: A műszaki ábrázolás alapjai

Kutatásom elején a hegesztési varratok ábrázolásával és a hozzájuk kapcsolódó szabványok felderítése közben kezdődött el ennek a műszaki ábrázolással kapcsolatos könyvnek a megírása Dr. Popa Müller Izolda társszerző asszonnyal együttműködve. A könyv részletei:

Cím: **A műszaki ábrázolás alapjai**

Szerző: **Popa-Müller Izolda, Hegedűs-Kuti János**

Kiadó: **Erdélyi Múzeum-Egyesület Kolozsvár**

Sorozat: **Műszaki Tudományos Füzetek**

Oldalak száma: **158**

Hivatkozások, irodalomjegyzék

1. Khanna, A. & Kaur, S. Internet of things (Iot), applications and challenges: a comprehensive review. *Wirel. Pers. Commun.* 114, 1687–1762, 2020
2. Wang, Q., Jiao, W., Wang, P. & Zhang, Y. Digital twin for human-robot interactive welding and welder behavior analysis. *IEEE/CAA J. Autom. Sinica* 8, 334–343, 2021
3. Saenz de Ugarte, B., A. Artiba, and Robert Pellerin. "Manufacturing execution system—a literature review." *Production planning and control* 525-539, 2009
4. Vogel-Heuser, B., Lee, J. & Leitão, P. Agents enabling cyber-physical production systems. *at-Automatisierungstechnik* 63, 777–789, 2015
5. Brzeskot, P. & Łatka, L. Development of the automatic method of detection and grouping of external welding imperfections. In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2412, 012012, IOP Publishing, 2022
6. Viřnář, J., Brezinová, J. & Brezina, J. Quality evaluation of welded joints of various steel welded by gmaw technology. *Ind. 4.0* 6, 87–92, 2021
7. Sedmak, S., Jovičić, R., Sedmak, A., Arandelović, M., & Đorđević, B. R. Influence of multiple defects in welded joints subjected to fatigue loading according to SIST EN ISO 5817: 2014. *Structural integrity and life*, 18(1), 77-81, 2018
8. Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394, 2018
9. Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International journal of production economics*, 229, 107776, 2020
10. Helle, R. H. & Lemu, H. G. A case study on use of 3d scanning for reverse engineering and quality control. *Mater. Today: Proc.* 45, 5255–5262, 2021
11. Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173, 2015
12. Venancio Teixeira, J., da Silva Hounsell, M., & Wildgrube Bertol, D. How CPS and Autonomous Robots are Integrated to other I4. 0 Technologies: a systematic literature review. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2279715, 2023

13. Rocchini, C. M. P. P. C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., & Scopigno, R. A low cost 3D scanner based on structured light. In computer graphics forum (Vol. 20, No. 3, pp. 299-308). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd, 2001
14. Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173, 2015
15. Nixon, M., & Rock, T. R. A Comparison of WirelessHART and ISA100. 11a. Whitepaper, Emerson Process Management, 1-36, 2012
16. Khosla, D., Sharma, M., Khanna, S. K., Khanna, P., & Kaur, G. Smart robotic arm. *Journal of Artificial Intelligence Research & Advances*, 6(2), 58-62, 2019
17. Teixeira, J. V., da Silva Hounsell, M., & Bertol, D. W. How CPS and Autonomous Robots are Integrated to other I4. 0 Technologies: a systematic literature review, 2023
18. Dafflon, B., Moalla, N., & Ouzrout, Y. The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2395-2412, 2021
19. Abdul-Qawy, A. S., Pramod, P. J., Magesh, E., & Srinivasulu, T. The internet of things (iot): An overview. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(12), 71-82, 2015
20. Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, 14(11), 4724-4734, 2018
21. Malik, P. K., Sharma, R., Singh, R., Gehlot, A., Satapathy, S. C., Alnumay, W. S., ... & Nayak, J. Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art. *Computer Communications*, 166, 125-139, 2021
22. Condry, M. W., & Nelson, C. B. Using smart edge IoT devices for safer, rapid response with industry IoT control operations. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 938-946, 2016
23. Aftab, M. A., Hussain, S. S., Ali, I. & Ustun, T. S. Iec 61850 based substation automation system: A survey. *Int. J. Electr.Power & Energy Syst.* 120, 106008, 2020
24. Laghari, A. A., Wu, K., Laghari, R. A., Ali, M., & Khan, A. A. A review and state of art of Internet of Things (IoT). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-19, 2021
25. Hassan, W. H. Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey. *Computer networks*, 148, 283-294, 2019

26. Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies*, 13(2), 494, 2020
27. Fan, J., Han, F., & Liu, H. Challenges of big data analysis. *National science review*, 1(2), 293-314, 2014
28. Yadav, G., & Paul, K. Architecture and security of SCADA systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 34, 100433, 2021
29. Vogel-Heuser, B., Lee, J. & Leitão, P. Agents enabling cyber-physical production systems. *at-Automatisierungstechnik* 63, 777–789, 2015
30. Nguyen, B. M., Tran, V. & Hluchy, L. High-level abstraction layers for development and deployment of cloud services, in *Networked Digital Technologies: 4th International Conference, NDT 2012, Dubai, UAE, April 24–26. Proceedings, Part I* 4, 208–219 (Springer), 2012
31. Kuss, A., Hollmann, R., Dietz, T., Hägele, M. et al. Manufacturing knowledge for industrial robot systems: Review and synthesis of model architecture, in *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 348–354 (IEEE), 2016
32. Wang, Q., Jiao, W., Wang, P. & Zhang, Y. Digital twin for human-robot interactive welding and welder behavior analysis. *IEEE/ CAA J. Autom. Sinica* 8, 334–343. 2021
33. Martinez, R.T.; Alfaro, S.C.A. Data analysis and modeling techniques of welding processes: The state-of-the-art. In *Welding-Modern Topics*; IntechOpen: London, UK, 2020
34. Mahadevan, R.; Jagan, A.; Pavithran, L.; Shrivastava, A.; Selvaraj, S.K. Intelligent welding by using machine learning techniques. *Mater. Today Proc.* 46, 7402–7410, 2021
35. Rababah, K., Mohd, H., & Ibrahim, H. Customer relationship management (CRM) processes from theory to practice: The preimplementation plan of CRM system. *International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, 1(1), 22-27, 2011
36. Almada-Lobo, F. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of innovation management*, 3(4), 16-21, 2015
37. Labrinidis, A., & Jagadish, H. V. Challenges and opportunities with big data. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 5(12), 2032-2033, 2012

38. Elgendy, N., & Elragal, A. Big data analytics: a literature review paper. In *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects: 14th Industrial Conference, ICDM 2014*, St. Petersburg, Russia, July 16-20. *Proceedings 14* (pp. 214-227). Springer International Publishing, 2014
39. Rajaraman, V. Big data analytics. *Resonance*, 21, 695-716, 2016
40. Kambatla, K., Kollias, G., Kumar, V., & Grama, A. Trends in big data analytics. *Journal of parallel and distributed computing*, 74(7), 2561-2573, 2014
41. Patil, A., Dwivedi, A., & Moktadir, M. A. Big data-Industry 4.0 readiness factors for sustainable supply chain management: Towards circularity. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109109, 2023
42. Liu, Y., He, J., Guo, M., Yang, Q., & Zhang, X. An overview of big data industry in China. *China Communications*, 11(12), 1-10, 2014
43. Stavridis, J.; Papacharalampopoulos, A.; Stavropoulos, P. Quality assessment in laser welding: A critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94, 1825–1847, 2018
44. Wang, B.; Li, F.; Lu, R.; Ni, X.; Zhu, W. Weld Feature Extraction Based on Semantic Segmentation Network. *Sensors* 22, 4130, 2022
45. Khan, M., Wu, X., Xu, X., & Dou, W. (May). Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE, 2017
46. Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S. O., Akinade, O. O., ... & Pasha, M. Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced engineering informatics*, 30(3), 500-521, 2016
47. Anand, K.; Elangovan, S.; Rathinasuriyan, C. Modeling and prediction of weld strength in ultrasonic metal welding process using artificial neural network and multiple regression method. *Mater. Sci. Eng. Int. J.* 2, 40–47, 2018
48. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. Significant applications of big data in Industry 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, 6(04), 429-447.SVM, 2021
49. Ghazal, A., Rabl, T., Hu, M., Raab, F., Poess, M., Crolotte, A., & Jacobsen, H. A. (June). Bigbench: Towards an industry standard benchmark for big data analytics. In *Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD international conference on Management of data* (pp. 1197-1208), 2013

50. Soori, M., Arezoo, B. & Dastres, R. Digital twin for smart manufacturing, a review. *Sustain. Manuf. Serv. Econ.* 2, 100017. [https:// doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017](https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017), 2023
51. Ma, S., Ding, W., Liu, Y., Ren, S. & Yang, H. Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries. *Appl. Energy* 326, 119986, 2022
52. Zafor, H., Sheikh, T., Mazumdar, N. & Nag, A. Data collection and recharging of sensor node by mobile sink in wireless sensor network. *Int. J. Sensors, Wirel. Commun. Control.* 14, 2024
53. Chang, I.-N., Chiu, C.-C. & Liu, W.-F. A new type of dynamic vibration fiber sensor. *Sensors* 24, 6973, 2024
54. Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y. & Duan, J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon* 9, 2023
55. Zhou, K., & Yao, P. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 124, 170-198, 2019
56. Balos, S.; Dramicanin, M.; Janjatovic, P.; Zabunov, I.; Pilić, B.; Goel, S.; Szutkowska, M. Suppressing the Use of Critical Raw Materials in Joining of AISI 304 Stainless Steel Using Activated Tungsten Inert Gas Welding. *Metals* 9, 1187, 2019
57. Cai, W., Wang, J., Zhou, Q., Yang, Y., & Jiang, P. (February). Equipment and machine learning in welding monitoring: A short review. In *Proceedings of the 5th International Conference on mechatronics and robotics engineering (9-15)*, 2019
58. Zhou, B., Pychynski, T., Reischl, M., Kharlamov, E., & Mikut, R. Machine learning with domain knowledge for predictive quality monitoring in resistance spot welding. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(4), 1139-1163, 2022
59. Sumesh, A., Rameshkumar, K., Mohandas, K., & Babu, R. S. Use of machine learning algorithms for weld quality monitoring using acoustic signature. *Procedia Computer Science*, 50, 316-322, 2015
60. Khumaidi, A., Yuniarno, E. M., & Purnomo, M. H. (August). Welding defect classification based on convolution neural network (CNN) and Gaussian kernel *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (pp. 261-265). IEEE, 2017

61. Wang, H., & Hu, D. (October). Comparison of SVM and LS-SVM for regression. *International conference on neural networks and brain* (Vol. 1, pp. 279-283). IEEE, 2005
62. Charbuty, B., & Abdulazeez, A. Classification based on decision tree algorithm for machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(01), 20-28, 2021
63. Ostromęcka, M.; Szymański, M. Preparation of Specimens for Macro and Microscopic Examinations of Dissimilar Friction Welded Steel Joints and Their Evaluation According to Applicable Standards. *Probl. Kolejnictwa Railw. Rep.* 66, 129–133, 2022
64. Li, X.; Li, X.; Ge, S.; Khyam, M.O.; Luo, C. Automatic Welding Seam Tracking and Identification. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 64, 7261–7271, 2017
65. Yin, Z.; Ma, X.; Zhen, X.; Li, W.; Cheng, W. Welding Seam Detection and Tracking Based on Laser Vision for Robotic Arc Welding. *J. Phys. Conf. Ser.* 1650, 22030, 2020
66. Li, G.; Hong, Y.; Gao, J.; Hong, B.; Li, X. Welding Seam Trajectory Recognition for Automated Skip Welding Guidance of a Spatially, 2017
67. Wang, C.N.; Yang, F.C.; Nguyen, V.T.T.; Vo, N.T.M. CFD Analysis and Optimum Design for a Centrifugal Pump Using an Effectively Artificial Intelligent Algorithm. *Micromachines* 13, 1–20, 2022
68. Kinzel, H. Industry 4.0-Where does this leave the human factor. *Journal of Urban Culture Research*, 15(1), 70-83, 2017
69. Minh, P.S.; Nguyen, V.T.; Nguyen, V.T.; Uyen, T.M.T.; Do, T.T.; Nguyen, V.T.T. Study on the Fatigue Strength of Welding Line in Injection Molding Products under Different Tensile Conditions. *Micromachines* 13, 1–10, 2022
70. Gook, S., Üstündağ, Ö., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*, 64(2), 407-417, 2020. Wang, B.; Li, F.; Lu, R.; Ni, X.; Zhu, W. Weld Feature Extraction Based on Semantic Segmentation Network. *Sensors* 22, 4130, 2022
71. Zou, L., Zheng, Y., & Lu, J. (June). An edge detection method for welding pool based on an improved Canny algorithm. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2785, No. 1, p. 012013). IOP Publishing, 2024

72. Hou, X., & Liu, H. (August). Welding image edge detection and identification research based on canny operator. In 2012 international conference on computer science and service system (pp. 250-253). IEEE, 2012
73. XIE, Z. M., & GAO, X. D. Edge detection of weld image based on Canny operator. transactions of the china welding institution, (1), 29-32, 2006
74. Mirzaei, F., Faridafshin, M., Movafeghi, A., & Faghihi, R. (February). Automated defect detection of weldments and castings using Canny, Sobel and Gaussian filter edge detectors: A comparison study. In The proceedings of the 4th Iranian International NDT Conference, 2017
75. Muravyov, S. V., & Nguyen, D. C. (October). Weld Defects Automatic Visual Recognition by Combined Application of Canny Edge Detector and Interval Fusion with Preference Aggregation. In 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT) (pp. 1-4). IEEE, 2022
76. Xu, Y., Yu, H., Zhong, J., Lin, T., & Chen, S. Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process. Industrial Robot: An International Journal, 39(5), 513-523, 2012
77. Mandal, N. R., & Mandal, N. R. Welding defects. Ship Construction and Welding, 283-292, 2017. Olympus, N. Phased array testing: Basic theory for industrial applications. Olympus NDT 2, 1, 2010
78. Wang, G., & Liao, T. W. Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images. Ndt & E International, 35(8), 519-528, 2002
79. Mery, D., & Berti, M. A. Automatic detection of welding defects using texture features. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 45(10), 676-681, 2003
80. Guo, K. W. A review of micro/nano welding and its future developments. Recent patents on Nanotechnology, 3(1), 53-60, 2009
81. Kah, P., Mvola, B., Martikainen, J., & Suoranta, R. Real time nondestructive testing methods of welding. Advanced Materials Research, 933, 109-116, 2014
82. Robinson, B. A., & Tester, J. W. Dispersed fluid flow in fractured reservoirs: An analysis of tracer-determined residence time distributions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B12), 10374-10384, 1984

83. Zhu, Q., Zhang, Q., Yang, P., Gai, H., Lin, M., Song, H., ... & Huang, T. Measuring segregation in fluidized bed with magnetizable and nonmagnetizable particles based on magnetic permeability. *Fuel*, 340, 127554, 2023
84. Daniels, H. P. C. Ultrasonic welding. *Ultrasonics*, 3(4), 190-196, 1965
85. Hardt, D. E., & Katz, J. M. Ultrasonic measurement of weld penetration. *Welding Journal*, 63(9), 273s-281s, 1984
86. Al-Sarraf, Z. S. A study of ultrasonic metal welding (Doctoral dissertation, University of Glasgow), 2013
87. Wittczak, T., Dudek, W., Walusiak-Skorupa, J., Świerczyńska-Machura, D., Cader, W., Kowalczyk, M., & Pałczyński, C. Metal-induced asthma and chest X-ray changes in welders. *International journal of occupational medicine and environmental health*, 25, 242-250, 2012
88. Camerini, C. G., Silva, V. M. A., Soares, I. A., Santos, R. W. F., Ramos, J. E., Santos, J. M. C., & Pereira, G. R. Ferrite content meter analysis for delta ferrite evaluation in superduplex stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 366-370, 2018
89. Hosseini, V. A., Hurtig, K., Eyzop, D., Östberg, A., Janiak, P., & Karlsson, L. Ferrite content measurement in super duplex stainless steel welds. *Welding in the World*, 63, 551-563, 2019
90. Aubrey, L. S., Wieser, P. F., Pollard, W. J., & Schoefer, E. A. Ferrite measurement and control in cast duplex stainless steels. In *Stainless Steel Castings*. ASTM International, 1982
91. Wells, T., & Miller, G. The effect of virtual reality technology on welding skill performance. *Journal of Agricultural Education*, 61(1), 152-171, 2020
92. Krawczyk, R., Słania, J., Golański, G., & Zieliński, A. Evaluation of the Properties and Microstructure of Thick-Walled Welded Joint of Wear Resistant Materials. *Materials*, 15(19), 7009, 2022
93. Rogala, P. & Wawak, S. Quality of the iso 9000 series of standards-perceptions of quality management experts. *Int. J. Qual. Serv. Sci.* 13, 509–525, 2021
94. Sága, M., Blatnická, M., Blatnický, M., Dižo, J., & Gerlici, J. Research of the fatigue life of welded joints of high strength steel S960 QL created using laser and electron beams. *Materials*, 13(11), 2539, 2020

95. Stavridis, J.; Papacharalampopoulos, A.; Stavropoulos, P. Quality assessment in laser welding: A critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94, 1825–1847, 2018
96. Luo, Q.; Fang, X.; Liu, L.; Yang, C.; Sun, Y. Automated visual defect detection for flat steel surface: A survey. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 69, 626–644, 2020
97. Katebi, M. R., McIntyre, J., Lee, T., & Grimble, M. J. Integrated process and control design for fast coordinate measuring machine. *Mechatronics*, 3(3), 343-368, 1993
98. Nikam, R. R. Coordinate Measuring Machine (CMM). *International Journal of Mechanical and Industrial Technology* ISSN, 2348-7593, 2018
99. Modjarrad, A. (March). Noncontact measurement using a laser scanning probe. In *In-Process Optical Measurements* (Vol. 1012, pp. 229-239). SPIE, 1989
100. Mada, S. K., Smith, M. L., Smith, L. N., & Midha, P. S. Overview of passive and active vision techniques for hand-held 3D data acquisition. *Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*, 4877, 16-27, 2003
101. Savenkov, A. P., Mordasov, M. M., & Chechetov, K. E. (September). Special aspects of applying the term “non-contact method of measurement” in monitoring of passive quantities. *International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies"(IT&QM&IS)* (pp. 274-278). IEEE, 2017
102. Henselmans, R. Noncontact measurement machine for freeform optics, 2009
103. Yang, B., Li, X., Hou, Y., Meier, A., Cheng, X., Choi, J. H., ... & Li, H. Non-invasive (noncontact) measurements of human thermal physiology signals and thermal comfort/discomfort poses-a review. *Energy and Buildings*, 224, 110261, 2020
104. Korb, C. L., Gentry, B. M., & Weng, C. Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Applied Optics*, 31(21), 4202-4213, 1992
105. Hasanuddin, M. O., Permana, G. E., Akbar, I., & Wuryandari, A. I. (August). 3D scanner for orthodontic using triangulation method. In *2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)* (pp. 360-364). IEEE, 2015
106. Forest Collado, J. New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners. *Universitat de Girona*, 2004
107. França, J. G. D., Gazziro, M. A., Ide, A. N., & Saito, J. H. (September). A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. In *IEEE International Conference on Image Processing 2005* (Vol. 1, pp. I-425). IEEE, 2005

108. Bell, T., Li, B., & Zhang, S. Structured light techniques and applications. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1-24, 1999
109. Li, Z., Shi, Y., Wang, C., & Wang, Y. Accurate calibration method for a structured light system. *Optical Engineering*, 47(5), 053604-053604, 2008
110. Gupta, M., Yin, Q., & Nayar, S. K. Structured light in sunlight. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 545-552), 2013
111. Wang, R., Law, A. C., Garcia, D., Yang, S., & Kong, Z. Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 845-862, 2021
112. Wang, C.W.; Peng, C.C. 3D face point cloud reconstruction and recognition using depth sensor. *Sensors* 21, 2587, 2021
113. Mahadevan, R.; Jagan, A.; Pavithran, L.; Shrivastava, A.; Selvaraj, S.K. Intelligent welding by using machine learning techniques. *Mater. Today Proc.* 46, 7402–7410, 2021
114. Boumchich, A.; Picaut, J.; Bocher, E. Using a Clustering Method to Detect Spatial Events in a Smartphone-Based Crowd-Sourced Database for Environmental Noise Assessment. *Sensors* 22, 8832, 2022
115. Khan, K., Rehman, S. U., Aziz, K., Fong, S., & Sarasvady, S. (February). DBSCAN: Past, present and future. In *The fifth international conference on the applications of digital information and web technologies (ICADIWT 2014)* (pp. 232-238). IEEE, 2014
116. Zhou, Q. Y., Park, J., & Koltun, V. Fast global registration. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11-14. Proceedings, Part II 14* (pp. 766-782). Springer International Publishing, 2016
117. Deng, D. (September). DBSCAN clustering algorithm based on density. In *2020 7th international forum on electrical engineering and automation (IFEEA)* (pp. 949-953). IEEE, 2020
118. Gan, J., & Tao, Y. (May). DBSCAN revisited: Mis-claim, un-fixability, and approximation. In *Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD international conference on management of data* (pp. 519-530), 2015
119. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer, 2021

120. Nasteski, V. An overview of the supervised machine learning methods. *Horizons*. b 4, 56, 2017. (Megjegyzés: Az eredeti 120-as tétel egy további, nem kapcsolódó hivatkozást tartalmazott, ami itt eltávolításra került.) Zhang, Q., Xiao, R., Liu, Z., Duan, J. & Qin, J. Process simulation and optimization of arc welding robot workstation based on digital twin. *Machines* 11, 53, 2023
121. Ranjan, R., Khan, A. R., Parikh, C., Jain, R., Mahto, R. P., Pal, S., ... & Chakravarty, D. Classification and identification of surface defects in friction stir welding: An image processing approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 237-253, 2016
122. Li, Y., Wang, Q., Xu, D., Yan, Z., & Tan, M. Recent developments on welding image processing and features extraction. *Measurement and Control*, 40(5), 139-145, 2007
123. Aubert, G., & Kornprobst, P. *Mathematical problems in image processing: partial differential equations and the calculus of variations* (Vol. 147, p. 1). New York, NY: Springer, 2006
124. Alpala, L. O., Quiroga-Parra, D. J., Torres, J. C., & Peluffo-Ordóñez, D. H. Smart factory using virtual reality and online multi-user: Towards a metaverse for experimental frameworks. *Applied Sciences*, 12(12), 6258, 2022
125. Terkaj, W., Pedrielli, G., & Sacco, M. (July). Virtual factory data model. In *Proceedings of the workshop on ontology and semantic web for manufacturing*, Graz, Austria (pp. 29-43), 2012
126. Upton, D. M., & McAfee, A. The real virtual factory. *Harvard Business Review*, 74(4), 123-133, 1996
127. Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 372-389, 2022
128. Magyar, P., Hegedűs-Kuti, J., Szőlősi, J., & Farkas, G. Real-time data visualization of welding robot data and preparation for future of digital twin system. *Scientific Reports*, 14(1), 10229, 2024
129. Berić, D., Stefanović, D., Lalić, B., & Ćosić, I. The implementation of ERP and MES Systems as a support to industrial management systems. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(2), 77, 2018
130. Wally, B., Huemer, C., Mazak, A., & Wimmer, M. (October). IEC 62264-2 for AutomationML. In *Proc. 5th Autom. ML User Conf* (pp. 1-7), 2018

131. Chen, S., Zong, G., Kang, C. & Jiang, X. Digital twin virtual welding approach of robotic friction stir welding based on co-simulation of fea model and robotic model. *Sensors* 24, 1001, DOI: 10.3390/s24031001, 2024
132. Wang, X., Hua, Y., Gao, J., Lin, Z. & Yu, R. Digital twin implementation of autonomous planning arc welding robot system. *Complex Syst. Model. Simul.* 3, 236–251, DOI: 10.23919/CSMS.2023.0013, 2023
133. Yang, L., Liu, Y. & Peng, J. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 110, 1027–1046, 2020
134. Wang, Z. Digital twin technology. In *Industry 4.0-impact on intelligent logistics and manufacturing* (IntechOpen), 2020
135. Baareh, A. K. M., Al-Jarrah, A., Smadi, A. M., & Shakah, G. H. Performance evaluation of edge detection using Sobel, Homogeneity and Prewitt algorithms. *Journal of Software Engineering and Applications*, 11(11), 537, 2018
136. Zhou, Q. Y., Park, J., & Koltun, V. Open3D: A modern library for 3D data processing. arXiv preprint arXiv:1801.09847, 2018
137. Hegedűs-Kuti, J., Szölösi, J., Varga, D., Abonyi, J., Andó, M., & Ruppert, T. 3d scanner-based identification of welding defects—clustering the results of point cloud alignment. *Sensors*, 23(5), 2503, 2023
138. Rusu, R. B., Blodow, N., & Beetz, M. (May). Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In *2009 IEEE international conference on robotics and automation* (pp. 3212-3217). IEEE, 2009
139. Zha, Y., Chen, M., & Lu, S. (June). Research on point cloud registration of industrial parts based on FGR-ICP algorithm. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1941, No. 1, p. 012014). IOP Publishing, 2021
140. Zhang, Y.; Qiao, D.; Xia, C.; He, Q. A Point Cloud Registration Method Based on Histogram and Vector Operations. *Electronics* 11, 4172, 2022
141. Wang, C.W.; Peng, C.C. 3D face point cloud reconstruction and recognition using depth sensor. *Sensors* 21, 2587, 2021
142. Perafan-Lopez, J.C.; Ferrer-Gregory, V.L.; Nieto-Londoño, C.; Sierra-Pérez, J. Performance Analysis and Architecture of a Clustering Hybrid Algorithm Called FA+ GA-DBSCAN Using Artificial Datasets. *Entropy* 24, 875, 2022

143. Karami, A., & Johansson, R. Choosing DBSCAN parameters automatically using differential evolution. *International Journal of Computer Applications*, 91(7), 1-11, 2014
144. Ťavodová, M., Náprstková, N., Hnilicová, M., & Beňo, P. Quality Evaluation of Welding Joints by Different Methods. *FME Transactions*, 48(4), 2020
145. Magyar, P., Hegedűs-Kuti, J., Szőlősi, J., & Farkas, G. Real-time data visualization of welding robot data and preparation for future of digital twin system. *Scientific Reports*, 14(1), 10229, 2024
146. Zhang, Q., Xiao, R., Liu, Z., Duan, J., & Qin, J. Process simulation and optimization of arc welding robot workstation based on digital twin. *Machines*, 11(1), 53, 2023
147. Zhou, Q. Y., Park, J., & Koltun, V. Open3D: A modern library for 3D data processing. *arXiv preprint arXiv:1801.09847*, 2018
148. Aribisala, A., Khan, M. S., & Husari, G. (October). Machine learning algorithms and their applications in classifying cyber-attacks on a smart grid network. In *2021 IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)* (pp. 0063-0069). IEEE, 2021
149. Deepthi, R. & Sankaraiah, S. Implementation of mobile platform using qt and opencv for image processing applications. In *2011 IEEE Conference on Open Systems*, 284–289 (IEEE), 2011
150. Patange, C. & Naidu, V. Blur removal and image merging for image enhancement on python. In *2023 International Conference on Network, Multimedia and Information Technology (NMITCON)*, 1–7 (IEEE), 2023
151. Peng-o, T. & Chaikan, P. High performance and energy efficient sobel edge detection. *Microprocess. Microsystems* 87, 104368, 2021
152. Kundu, P. Effectiveness of edge detection of colour images, 2020
153. Lynn, N., Sourav, A. & Santoso, A. Implementation of real-time edge detection using canny and sobel algorithms. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1096, 012079 (IOP Publishing), 2021
154. Shah, B. K., Kedia, V., Raut, R., Ansari, S. & Shroff, A. Evaluation and comparative study of edge detection techniques. *IOSR J. Comput. Eng.* 22, 6–15, 2020

155. Sun, X., Mazur, M., & Cheng, C. T. A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 67, 103463, 2023
156. Birosz, M. T., Gál, A., Hegedűs-Kuti, J., & Andó, M. Lazy thermal annealing of material extrusion-based 3D-printed PLA specimens. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-7, 2024
157. Karami, A., & Johansson, R. Choosing DBSCAN parameters automatically using differential evolution. *International Journal of Computer Applications*, 91(7), 1-11, 2014
158. Chai, T., & Draxler, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). *Geoscientific model development discussions*, 7(1), 1525-1534, 2014
159. Hegedűs-Kuti, J., Szőlósi, J., Birosz, M. T., Csobán, A., Popa-Müller, I., & Andó, M. Extending the Welding Seams Detection as Preparation Towards the Digital Twin Technology. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 7(1), e70027, 2025

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Csobán Attilának, Dr. Andó Mátyásnak és Dr. Ruppert Tamásnak, akik segítséget nyújtottak a kutatási feladataim elvégzése során. A cikkek elkészítésében továbbá a disszertáció megírásában minden lehetséges módon támogattak.

Köszönetet mondok az ELTE munkatársainak, drága kollegáimnak, többek között Szőlősi Józsefnek, Birosz Márton Tamásnak, Magyar Péternek és Dr. Varga Dánielnek, akik segítettek frissen tartani a hasznos tanácsaikkal az innovatív haladást.

Köszönettel tartozom Szüleimnek, Családomnak, különösen drága Feleségemnek Eszternek és Gyermekeimnek Johannának és Lottikának, hogy sokszor tudtak nélkülözni, így is segítve kutatói feladataim elvégzését.

