



HEGESZTŐ ROBOTRENDSZEREK OPTIMALIZÁLÁSI ÉS ADAPTÍV VEZÉRLÉSI STRATÉGIÁI

OPTIMISATION AND ADAPTIVE CONTROL STRATEGIES FOR WELDING ROBOT SYSTEMS

Aichaoui Nada El Yasmine,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, jasminnada77@gmail.com

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

This paper delves into the evolving landscape of welding robotics, particularly the integration of adaptive control strategies for optimising human-robot interaction. Collaborative robotics (cobotics) underscores the significance of adaptive control for secure effective and safe cooperation between humans and robots in welding tasks. Past research highlights optimisation techniques such as model-based optimization and genetic algorithms, alongside adaptive control strategies that dynamically adjust parameters based on real-time feedback. These advancements promise enhanced safety, efficiency, and competitiveness in industrial welding automation.

Keywords: *welding robotics, adaptive control, human-robot interaction, optimization techniques.*

Összefoglalás

Ez a tanulmány a hegesztőrobotika fejlődő területét vizsgálja, különös tekintettel az ember-robot interakció optimalizálását célzó adaptív vezérlési stratégiák integrálására. A kollaboratív robotika (kobotika) kiemeli az adaptív vezérlés jelentőségét az ember és a robotok közötti hatékony és biztonságos együttműködés biztosítása érdekében a hegesztési feladatokban. A korábbi kutatások olyan optimalizálási technikákat emelnek ki, mint a modellalapú optimalizálás és a genetikai algoritmusok, valamint olyan adaptív vezérlési stratégiákat, amelyek dinamikus, valós idejű visszajelzések alapján állítják be a paramétereket. Ezek a fejlesztések fokozott biztonságot, hatékonyságot és versenyképességet ígérnek az ipari hegesztés automatizálásában.

Kulcsszavak: *hegesztőrobot, adaptív vezérlés, ember-robot interakció, optimalizálási technikák.*

1. Bevezetés

A robotika a tudományos szférában található társaihoz képest viszonylag új keletű tudományág. A robotok alapvetően olyan technológiák, mint a motorok, érzékelők és számítástechnikai rendszerek komplex rendszeréből állnak. A robottechnika akkor született meg, amikor ezek az egyes technológiák elérték azt az érettségi szintet, hogy harmonikusan integrálhatók legyenek. A robotika megkülönböztető szempontja, hogy az újszerű alkalmazások kidolgozása és feltárása érdekében nem függ a technológiai fejlesztéstől.

Ez az eredendő függés izgalmas elemet ad a területnek, mivel a technológiai fejlődéssel párhuzamosan folyamatosan fejlődik [1]. Kétségtelen, hogy a robotika elért egy bizonyos szintű érettséget a különböző környezetekben végzett speciális feladatokhoz, és ezt az aspektust az iparág széles körben kihasználja a termelékenység fokozása érdekében.

A robotika előtt álló egyik legnagyobb kihívás az olyan forgatókönyvekben rejlik, amelyekben a robotok fizikailag érintkeznek az emberekkel, ami egy ígéretes terület. Míg a robotokat általá-

ban ipari környezetben alkalmazzák, alkalmazásuk gyakran azzal jár, hogy a dolgozók biztonsága érdekében elszigetelik őket a cellákon belül. Ennek ellenére számos feladat továbbra is érett az automatizálásra, ami olyan operátorokat igényel, akik képesek olyan összetett helyzetekben eligazodni, amelyeket a robotok nem tudnak teljes mértékben kezelni [1]. Erre válaszul jelent meg a kobotika, amely megkönnyíti az emberek és a robotok közötti együttműködést. A jelentős lehetőségek ellenére a kobotika még mindig gyerekcipőben jár, és az ember-robot interakciókkal kapcsolatos biztonsági aggályok állnak előtérben [2].

Érdekes módon az ilyen ember-robot interakcióban rejlő alapvető kérdés már a robotika kezdete előtt felmerült, és a kibernetika területéről származik. A kibernetika a II. világháború idején alakult ki, és olyan rendszerek kidolgozására törekedett, amelyek képesek megjósolni és elfogadni az emberi reakciókat a robotok cselekedeteire. Norbert Wiener volt e terület úttörője a „prediktor” nevű automata pilótarendszer megalkotásával, amelyet arra terveztek, hogy előre jelezze a pilóta kitérési pályáját a légvédelmi lövedékek ellen. Wiener "Cybernetics or Control and Communication in Animals and the Machine" (Kibernetika vagy irányítás és kommunikáció az állatokban és a gépekben) című alapvető műve a biológiai szervezetekre és a gépekre egyaránt alkalmazható irányítási és kommunikációs elmélet bemutatásával segítette e kutatási terület előkészítését [3]. Ebben a keretben gyökerezik az emberekkel kölcsönhatásban lévő robotika kutatása.

Összességében az ipari robotokat különösen az különbözteti meg a hagyományosabb termelési és összeszerelő berendezésektől, hogy számos különböző feladat elvégzésére képesek. E különböző feladatok elvégzéséhez az ipari robotnak gyakran program vagy szerszámcserét kell végrehajtania, vagy akár mozgásokat kell végeznie, miközben figyelembe kell vennie a pillanatnyi állapotot és a gyártás előzményeit. Ez még inkább igaz egy dinamikus ütemezési környezetben, ahol esetleg meg kell változtatni egy döntést, vagy meg kell szakítani az aktuális feladatokat. Egy reális és pontos ütemezési modellnek figyelembe kell vennie ezeket az állapotváltoztatási műveleteket és az elvégzett különböző feladatok sajátosságait (időtartam, foglalt kapacitás stb.) [4].

A hegesztőrobot, az egyik legvégső kobotikai területre lépve, olyan vezérlőrendszerekkel rendelkezik, amelyek a fejlett automatizálás és a precizitás irányába történő jelentős fejlődést tükrözik. A hagyományos vezérlőrendszerek

nagymértékben támaszkodtak előre meghatározott pályákra és rögzített paraméterekre, ami korlátozta a hegesztési körülmények és a munkadarab geometriájának változásaihoz való alkalmazkodóképességüket. A legújabb fejlesztések azonban forradalmasították ezt a tájat. A modern hegesztőrobot-vezérlőrendszerek olyan kifinomult érzékelőtechnológiákat tartalmaznak, mint a látórendszerek, lézerszkennerek és erő- és nyomtérképezők, amelyek lehetővé teszik a valós idejű visszajelzést és az adaptív vezérlést. Ezek a rendszerek fejlett algoritmusokat használnak, beleértve a gépi tanulást és a mesterséges intelligenciát, a hegesztési paraméterek és pályák dinamikus optimalizálására. Továbbá kiemelkedő trendként jelentek meg a fejlett biztonsági funkciókkal rendelkező együttműködő robotok (cobotok), amelyek lehetővé teszik az ember-robot együttműködést a hegesztési feladatokban [5]. A felhőalapú számítástechnikával és az adatelemzéssel való integráció megkönnyíti a távfelügyeletet, a prediktív karbantartást és a hegesztési folyamatok folyamatos fejlesztését. Összességében a hegesztőrobot-vezérlőrendszerek jelenlegi korszerűsége a rugalmasságot, a hatékonyságot és a minőséget hangsúlyozza, megnyitva az utat a termelékenység és a versenyképesség növelése előtt a hegesztési technológiára támaszkodó iparágakban [6].

A hegesztőrobot-rendszerek hagyományos vezérlési módszerei számos olyan kihívással szembesülnek, amelyek akadályozzák hatékonyságukat a modern gyártási környezet követelményeinek teljesítésében [5]. Az egyik jelentős kihívás a hegesztési körülmények változásaihoz való korlátozott alkalmazkodóképességük, például az anyagtulajdonságok, a kötésgeometria vagy az olyan környezeti tényezők, mint a hőmérséklet és a páratartalom változásai. A hagyományos vezérlők gyakran előre meghatározott pályákra és rögzített paraméterekre támaszkodnak, így alkalmatlanok a valós hegesztési alkalmazásokban előforduló dinamikus helyzetek kezelésére. Ez a merevség olyan problémákhoz vezethet, mint a gyenge hegesztési minőség, az inkonzisztens gyöngyprofilok, valamint a megnövekedett utómunka- vagy selejtarány. A hagyományos vezérlők ráadásul nem tudnak valós időben reagálni a hegesztési folyamat során fellépő zavarokra vagy anomáliákra, ami a termelékenység és a hatékonyság csökkenéséhez vezet. Ezen túlmenően ezek a vezérlési módszerek nehezen tudják optimalizálni a hegesztési paramétereket a különböző anyagok vagy hegesztési technikák esetében, ami

nem optimális teljesítményhez és megnövekedett üzemeltetési költségekhez vezet. Összefoglalva, a hagyományos vezérlési módszerek előtt álló kihívások rávilágítanak arra, hogy a modern gyártási követelmények komplexitásának hatékony kezelése érdekében a hegesztőrobotok vezérléséhez adaptívabb, intelligensebb és rugalmasabb megközelítésekre van szükség [7].

1.1. A technika jelenlegi állása

A hegesztés területén az optimalizálásra és az adaptív vezérlésre összpontosító korábbi tanulmányok és kutatások jelentős előrelépést értek el a hegesztési műveletek teljesítményének, hatékonyságának és általános minőségének javításában. Kiterjedt vizsgálatokat végeztek az optimalizálási módszerekkel kapcsolatban, amelyek a hegesztési folyamatok különböző aspektusait célozták meg, a pályatervezéstől és a paraméterek beállításától kezdve az erőforrások elosztásáig. Matematikai optimalizálási keretrendszerek, például genetikai algoritmusok, részecske-raj-optimalizálás és szimulált lágyítás segítségével a kutatók arra törekedtek, hogy finomhangolják a hegesztési paramétereket, például a feszültséget, az áramot, a haladási sebességet és a huzaleltolási sebességet [8]. Ezeknek az optimalizálási törekvéseknek az elsődleges célja a gyakori hegesztési hibák, köztük a porozitás, az alulvágás és a fröccsenés mérséklése, miközben egyidejűleg maximalizálják a termelékenységet és a hegesztés integritását [9].

Az adaptív szabályozási stratégiák szintén a kutatások középpontjában állnak, amelyek célja a szabályozási paraméterek dinamikus beállítása az érzékelők és a környezeti feltételek valós idejű visszajelzései alapján [8]. Az adaptív szabályozási technikák, mint például a modelljósó szabályozás, a fuzzy logikai szabályozás és a neurális hálózatok lehetővé teszik a hegesztőrobotok számára, hogy alkalmazkodjanak a munkadarab geometriájának, az anyagjellemzőknek és a hegesztési körülményeknek a változásaihoz. A kulcsfontosságú folyamatváltozók, például az ívfeszültség, a hegesztési áram és a fáklya irányultságának folyamatos figyelemmel kíséréseivel az adaptív vezérlőrendszerek kompenzálhatják a zavarokat, optimalizálhatják a hegesztési gyöngy geometriáját, és javíthatják a folyamat általános stabilitását és robusztusságát [9].

A kutatási erőfeszítések, továbbá a fejlett érzékelési technológiák, például látórendszerek, lézerszenzorok és hőkamerák integrációját is vizsgálták, hogy átfogó visszajelzést biztosítsanak

az adaptív vezérlő algoritmusok számára. Ezek az érzékelési technológiák lehetővé teszik a hegesztőrobotok számára, hogy pontosan érzékeljék az illesztési hibákat, a varratkövetési hibákat és a felületi szabálytalanságokat, megkönnyítve a pontos vezérlést és korrekciót a hegesztési folyamat során [5]. Összességében a hegesztés optimalizálásával és adaptív vezérlésével kapcsolatos korábbi kutatások bebizonyították, hogy a hegesztési folyamatok teljesítményének és hatékonyságának jelentős növelésére van lehetőség, ami megnyitotta az utat a korszerűbb és intelligensebb hegesztőrobot-rendszerek kifejlesztése előtt, amelyek képesek megfelelni a modern feldolgozóipar követelményeinek [8].

A kutatás középpontjában a hegesztés automatizálására szolgáló intelligens vezérlési technikák fejlesztése áll. A kutatási terület magában foglalja annak vizsgálatát, hogy hogyan lehet a hegesztési útvonalat és a hegesztési medence geometriáját valós időben szabályozni. A kutatás céljai három kategóriába sorolhatók: probléma megfogalmazása, optimalizálás és adaptív vezérlés. Először egy fizikai folyamat és matematikai modell kerül vizsgálatra és kidolgozásra a hegesztési folyamat dinamikus viselkedésének leírására. Ezután egy sor optimalizálási és adaptív szabályozási technikát tanulmányozunk és fejlesztünk ki a hegesztési folyamat hatékony és eredményes vezérlése érdekében. Az intelligens vezérlési stratégiák kifejlesztése után kísérleti validálásra kerül sor a javasolt vezérlési technikák helyességének és hatékonyságának ellenőrzése érdekében. A kutatás eredménye várhatóan szisztematikus eljárást biztosít majd az adaptív vezérlés és optimalizálás fejlesztéséhez. Ezt a hegesztésautomatizálási feladatokat széles körben lehetne hasznosítani, mint például a hegesztőrobotok intelligens vezérlési sémáinak kifejlesztése, az automatizált hegesztési folyamat valós idejű felügyeleti és vezérlési rendszerének kifejlesztése, valamint a legkorszerűbb képzési lehetőségek biztosítása a hegesztés területén stb. Ezenkívül a kutatásból származó tudományos eredmények az alapvető megértést és a műszaki képességeket is javítanák a vezérlés és az automatizálás területén.

Ennél is fontosabb, hogy megteremtse az alapokat a különböző folyamatban lévő és jövőbeli interdiszciplináris kutatási tevékenységek előmozdításához, amelyek mind az oktatáshoz, mind az ipari tanácsadáshoz kapcsolódnak, mint például a helyi ipar számára a modern hegesztési stratégiákkal és automatizálással kapcsolatos vállalati képzési programok, új hegesztési eljárások,

például a TIG- és lézerhegesztés automatizálása, valamint az egyedi, kutatóorientált berendezések fejlesztése a kapcsolódó tudományos és ipari felhasználásra.

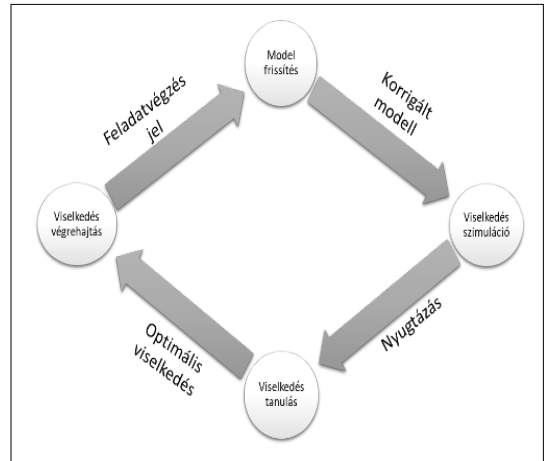
1.2. Az optimalizálási technikák háttere a hegesztésben

1.2.1. Modellalapú optimalizálás

A modellalapú optimalizálás a hegesztés során matematikai modelleket használ a hegesztési folyamatok szimulálására és finomítására, olyan egyenletek beépítésével, amelyek a hegesztés során jelen lévő fizikai jelenségeket, például a hőátadást, a folyadékáramlást és a metallurgiai változásokat reprezentálják. Ezeket a számítási modelleket úgy hozzák létre, hogy különböző körülmények között emulálják a hegesztési viselkedést, előrejelzik a különböző paraméter-kombinációk eredményeit a kívánt hegesztési tulajdonságok optimális konfigurációinak meghatározása érdekében. Ez a módszer elősegíti a hegesztési paraméterek és a hegesztés minőségére gyakorolt hatások összetett kölcsönhatásának szisztematikus megértését, lehetővé téve a különböző folyamatváltozók és forgatókönyvek alapos vizsgálatát kiterjedt kísérletezés nélkül. Ennek ellenére a pontos és számítási szempontból hatékony modellek megalkotása kihívást jelent, ami a hegesztés fizikájának mélyreható megértését és bonyolult numerikus algoritmusokat igényel. Továbbá a szimulációs eredmények és a valós világ eredményei között eltérések keletkezhetnek, mivel a tényleges hegesztési folyamatok bonyolultságát nem lehet teljes mértékben leképezni [10].

A modellalapú és a gépi tanulás más formái közötti elsődleges különbség abban rejlik, hogy a tanulási folyamat az ágens és környezete közötti kölcsönhatásokra támaszkodik. Következésképpen az ágens közvetlenül a környezetéből, külső utasítás nélkül sajátítja el a feladat-specifikus tudást. Az ágens és a környezet közötti elhatárolás azonban nem mindig egyszerű, és az alkalmazástól függ [11]. Például az olyan feladatokban, mint a kétlábú járás és az UAV-irányítás, a környezet feltételezhetően magában foglalja a robot motorjait.

A modellalapú módszerekben az átmenet dinamikájának modelljét használják a jutalmak és az optimális cselekvések levezetésére, a politikákat a modellben optimalizálják, majd ezt követően alkalmazzák a fizikai rendszerre. Az 1. ábra a modellalapú megerősítési tanulás csővezetékét szemlélteti.



1. ábra. Modellalapú tanulás folyamata

1.2.2. Genetikus algoritmusok (GA)

A GA-k a természetes szelekció és evolúció által inspirált optimalizálási technikát képviselik, ahol a potenciális megoldások populációja egymást követő generációkon keresztül fejlődik olyan folyamatok révén, mint a szelekció, a keresztezés és a mutáció, és a legmegfelelőbb egyedek kerülnek kiválasztásra a további szaporodáshoz. A hegesztés során a GA-kat a hegesztési paraméterek optimalizálására alkalmazzák, egy populáción belül kromoszómaként kódolva azokat.

Az algoritmus iteratív generációkon keresztül értékeli az egyes megoldások alkalmasságát előre meghatározott objektív függvények, például hegesztési minőségi metrikák alapján, és kiválasztja a legjobban teljesítő egyedeket a következő generációkhoz. A GA-k olyan robusztus megközelítést kínálnak, amely képes összetett, nem lineáris optimalizálási problémák kezelésére, több célkitűzéssel és korlátozással, nagy megoldási terek hatékony feltárására és a közel optimális megoldások viszonylag rövid idő alatt történő azonosítására. A GA-k hatékony alkalmazása azonban gondos paraméter-hangolást és a megfelelő genetikai operátorok kiválasztását igényli az értelmes megoldásokhoz való konvergencia biztosítása érdekében, míg a számítási komplexitás a nagy dimenziójú optimalizálási problémák vagy számításgényes hegesztési modellek esetében megfizethetetlen lehet [12].

1.2.3. Részecskeraj-optimalizálás (PSO)

A PSO koncepciója az olyan organizmusok kollektív viselkedéséből származik, mint a madárraj vagy a halrajok, és egy populációalapú, sztochasztikus

tikus optimalizálási technikaként szolgál. A PSO-ban a potenciális megoldások egy csoportja, amelyet részecskékként ábrázolnak, folyamatosan módosítja pozícióját a keresési térben az egyéni tapasztalatok és a rajon belüli megosztott tudás alapján. Minden egyes részecske egy hegesztési paraméterekből álló potenciális megoldást testesít meg, és mozgását a személyes, legjobb, ismert pozíciója, valamint a raj által felfedezett kollektív, legjobb, ismert pozíció irányítja. Ezen az iteratív folyamaton keresztül a raj fokozatosan konvergál a megoldási tér ígéretes területei felé, így a PSO különösen előnyös a folytonos megoldási térrel és sima célfüggvényekkel jellemezhető feladatok esetében. Viszonylag könnyű megvalósíthatósága és számítási hatékonysága ellenére a PSO hatékonyságát befolyásolhatja a vezérlési paraméterek gondos megválasztása, és bonyolult, multimodális optimalizálási forgatókönyvekben nehézségekbe ütközhet a lokális optimumok elhagyása [13].

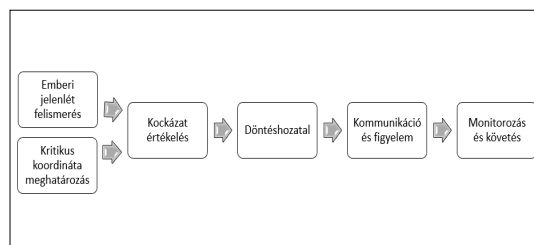
1.3. Adaptív vezérlés a hegesztésben

A hegesztés adaptív vezérlési stratégiái a hegesztési folyamatok optimalizálásának dinamikus megközelítést jelentik a vezérlési paraméterek folyamatos beállításával, az érzékelők és a környezeti feltételek valós idejű visszajelzéseire reagálva. Ezeket a stratégiákat úgy tervezték, hogy a hegesztőrobotok gyorsan alkalmazkodjanak a munkadarab geometriájának, az anyagtulajdonságoknak és a hegesztési folyamatot befolyásoló egyéb tényezőknek a változásaihoz, ezáltal növelve a folyamat általános stabilitását és robusztuságát.

A kritikus folyamatváltozók, például az ívfeszültség, a hegesztési áram és a fáklya irányultságának folyamatos figyelemmel kísérése révén az adaptív vezérlőrendszerek hatékonyan kompenzálják a hegesztési műveletek során fellépő zavarokat és változásokat [9]. Ez az alkalmazkodóképesség biztosítja, hogy a hegesztési paraméterek az adott körülményekhez optimalizáltak maradjanak, ami a hegesztés minőségének és termelékenységének javulásához vezet. Továbbá a gépi tanulási módszerek és a fejlett érzékelési technológiák, például a látórendszerek és a hőkamerák integrálása tovább fokozza az adaptív vezérlőrendszerek alkalmazkodóképességét és pontosságát azáltal, hogy átfogó visszajelzést ad a hegesztési környezetről. Összességében az adaptív vezérlési stratégiák döntő előrelépést jelentenek a hegesztéstechnológiában, mivel lehetőséget nyújtanak a következetesen jó minőségű hegesztési varratok

létrehozására, miközben maximalizálják a hatékonyságot, és minimalizálják a hibákat a különböző üzemi körülmények között [8].

Ezenkívül kulcsfontosságú az ember és a hegesztőrobotok közötti interakció optimalizálásában, különösen az együttműködő robotika vagy a kobotika forgatókönyveiben. Az ilyen felállásokban, ahol emberek és robotok közös terekben dolgoznak együtt, az adaptív vezérlési stratégiák elengedhetetlenek a biztonságos és hatékony együttműködés biztosításához. Ezek a stratégiák magukban foglalják a robot viselkedésének dinamikus beállítását az emberi kezelő mozgását, mozgását és biztonságát figyelő érzékelők valós idejű visszajelzése alapján. Az adaptív vezérlőrendszerek például az ütközések vagy balesetek megelőzése érdekében módosíthatják a robot sebességét, pályáját és erő kifejtését, így biztosítva az emberi kezelő biztonságát. Az adaptív vezérlés lehetővé teszi továbbá, hogy a robot az emberi kezelő cselekedeteinek, preferenciáinak és képességeinek változásaihoz igazítsa viselkedését, javítva ezzel az együttműködés általános élményét [8]. Az ember és a hegesztőrobot közötti interakció folyamatos figyelemmel kíséréssel és elemzésével az adaptív vezérlőrendszerek optimalizálhatják a feladat végrehajtását, minimalizálhatják a hibákat és maximalizálhatják a termelékenységet. Emellett az adaptív vezérlés lehetővé teszi a zökkenőmentes váltást az autonóm robotműködés és az együttműködő üzemmódok között, rugalmasságot és sokoldalúságot biztosítva a különböző hegesztési alkalmazásokban [9]. Összességében az adaptív vezérlés alkalmazása az ember-robot interakció optimalizálásában, hegesztési környezetben, nemcsak a biztonságot és a hatékonyságot növeli, hanem elősegíti az ember és a robotok közötti intuitívabb és harmonikusabb munkakapcsolatot is. A 2. ábra a hegesztőrobot vezérlésének lépéseit szemlélteti, hogy ne csak az emberi biztonságot, hanem a gyártás minőségét is biztosítsa.



2. ábra. Biztonsági és minőségbiztosítási lépések a hegesztőrobotok vezérlésében

2. Következtetések

A hegesztéstechnológia jelenlegi állapotából hiányzik a paraméterek optimalizálására és a hibák azonosítására szolgáló fejlett algoritmusok széles körű integrálása, ami a korlátozottan hozzáférhető információkból is kitéunik. A legújabb fejlesztések azonban ígéretes előrelépést mutattak a neurális hálózatok felhasználása terén ezen folyamatok automatizálására, bár még korai stádiumban [5].

A gépi tanulás hegesztésben való alkalmazása jelentős fejlődési potenciált mutat, bár az ipari alkalmazás előtt további kutatásra és fejlesztésre van szükség. A gépi tanulás integrálása a hegesztési rendszerekbe értékes lehetőséget jelent a fejlődésre, mivel a neurális hálózatok és más kifinomult algoritmusok alkalmazásával jobb paraméter-optimalizálást és nagyobb pontosságú és hatékonyabb hibafelismerést kínál. Ez az automatizálási lehetőség növelheti a termelékenységet és a hegesztés minőségét, és csökkentheti a kézi beállításoktól és az emberi ellenőrzéstől való függőséget. Mindazonáltal a fejlett algoritmusok ipari hegesztésbe való beépítése jelentős időt és erőforrásokat igényel, és a megbízható megvalósításhoz olyan kihívásokat kell megoldani, mint az adatok elérhetősége, az algoritmus robusztussága és a számítási követelmények.

A jövőre nézve az intelligens hegesztési rendszerek jövője a gépi tanulási módszerek folyamatos fejlesztésétől és továbbfejlesztésétől függ. A további kutatásokkal a kifejezetten a hegesztési folyamatokra szabott algoritmusokat lehet kifejleszteni, amelyek nemcsak az automatikus paraméter-optimalizálást és a hibaelhárítást teszik lehetővé, hanem a valós idejű döntéshozatalt, az adaptív vezérlést és a meglévő hegesztési infrastruktúrába való zökkenőmentes integrációt is.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bibby L., Dehe B.: *Defining and Assessing Industry 4.0 Maturity Levels-Case of the Defence Sector*. Production Planning & Control, 29/12. (2018) 1030–1043.
- [2] Barcellini F., Béarée R., Bencheikroun T. H., Bounouar M., Buchmann W., Dubey G., Siadat

A.: *Promises of Industry 4.0 under the Magnifying Glass of Interdisciplinarity: Revealing Operators and Managers Work and Challenging Collaborative Robot Design*. Cognition, Technology & Work, (2023) 1–21.

- [3] Wiener N.: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press. (2019).
- [4] Hajji A., Pellerin R.: *Ordonnancement dynamique et contrôle intelligent d'un robot industriel*, (2023).
- [5] Wang B., Hu S. J., Sun L., Freiheit T.: *Intelligent Welding System Technologies: State-of-the-Art Review and Perspectives*. Journal of Manufacturing Systems, 56. (2020) 373–391.
- [6] Rout A., Deepak B. B. V. L., Biswal B. B.: *Advances in Weld Seam Tracking Techniques for Robotic Welding: A Review*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 56. (2019) 12–37.
- [7] Pires J. N., Loureiro A., Bölmsjö G.: *Welding Robots: Technology, System Issues and Application*. Springer Science & Business Media (2006).
- [8] Doumanidis C. C., Hardt D. E.: *Multivariable Adaptive Control of Thermal Properties during Welding* (1991).
- [9] Aldalur E., Suárez A., Curiel D., Veiga F., Villanueva P.: *Intelligent and Adaptive System for Welding Process Automation in T-Shaped Joints*. Metals, 13/9. (2023) 1532.
- [10] Chen F. F., Xiang J., Thomas D. G., Murphy A. B.: *Model-Based Parameter Optimization for Arc Welding Process Simulation*. Applied Mathematical Modelling, 81. (2020) 386–400.
- [11] Tabar R. S., Wärmefjord K., Söderberg R.: *A New Surrogate Model-Based Method for Individualized Spot Welding Sequence Optimization Concerning Geometrical Quality*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106. (2020) 2333–2346.
- [12] Nagesh D. S., Datta G. L.: *Genetic Algorithm for Optimization of Welding Variables for Height to Width Ratio and Application of ANN for Prediction of Bead Geometry for TIG Welding Process*. Applied Soft Computing, 10/3. (2010) 897–907.
- [13] Tafarroj M. M., Moghaddam M. A., Dalir H., Kolahan F.: *Using Hybrid Artificial Neural Network and Particle Swarm Optimization Algorithm for Modeling and Optimization of Welding Process*. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 20/04. (2021) 783–799.