Broj rada: 5.7
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.029

PAMETNE ĆELIJE ZA ZAVARIVANJE U INDUSTRIJI 4.0: Optimizacija proizvodnih procesa primjenom kolaborativnih robota i umjetne inteligencije

SMART WELDING CELLS IN INDUSTRY 4.0 Optimization of Manufacturing Processes Using Collaborative Robots and Artificial Intelligence

Prof. dr. Isak Karabegović[1], ORCID: 0000-0001-9440-4441,
Prof. dr. Sead Pašić[2], ORCID: 0009-0004-6241-5129

[1] Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine,
71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina
[2]Univerzitet "Džemal Bijedić", Mašinski fakultet, Mostar
88104 Mostar, Bosna i Hercegovina,

E-mail: isak1910@hotmail.com

Rezime: U savremenoj industriji, procesi zavarivanja predstavljaju ključnu fazu proizvodnje koja direktno utiče na kvalitet, sigurnost i pouzdanost finalnih proizvoda. Razvoj koncepta Industrije 4.0 omogućio je integraciju naprednih tehnologija, poput kolaborativnih robota i umjetne inteligencije, u cilju povećanja fleksibilnosti, produktivnosti i adaptivnosti proizvodnih sistema. Ovaj rad istražuje primjenu pametnih ćelija za zavarivanje zasnovanih na saradnji čovjeka i robota, uz podršku AI algoritama za optimizaciju procesa. Predloženi sistem obuhvata integraciju kolaborativnog robota, senzorskih sistema i modela mašinskog učenja za real-time praćenje i adaptivno upravljanje parametrima zavarivanja. Poseban fokus stavljen je na detekciju grešaka u zavaru korištenjem vizuelnih i procesnih podataka, kao i na predikciju kvaliteta zavarenih spojeva. Analiza obuhvata poređenje tradicionalnog pristupa zavarivanju i automatizovanog sistema sa implementiranim AI modelom. Rezultati istraživanja pokazuju značajno poboljšanje kvaliteta zavara, smanjenje broja grešaka i optimizaciju vremena ciklusa. Također je evidentirano smanjenje neplaniranih zastoja i povećanje ukupne efikasnosti proizvodnog sistema. Integracija kolaborativnih robota omogućava sigurnu i efikasnu interakciju sa operaterima, dok AI doprinosi donošenju brzih i pouzdanih odluka u realnom vremenu.

Ključne riječi: kolaborativni roboti, umjetna inteligencija, zavarivanje, optimizacija procesa.

Abstract: In the modern industry, welding processes represent a critical stage of production that directly affects the quality, safety, and reliability of final products. The development of the Industry 4.0 paradigm has enabled the integration of advanced technologies, such as collaborative robots and artificial intelligence, with the aim of enhancing the flexibility, productivity, and adaptability of manufacturing systems. This paper investigates the application of smart welding cells based on human–robot collaboration, supported by AI algorithms for process optimization. The proposed system integrates a collaborative robot, sensor systems, and machine learning models for real-time monitoring and adaptive control of welding parameters. Emphasis is placed on weld defect detection using visual and process data, as well as on the prediction of weld quality. This analyse includes a comparison between a traditional welding approach and an automated system incorporating an AI-based model.

The research results indicate significant improvements in weld quality, a reduction in defect rates, and optimization of cycle time. Additionally, a decrease in unplanned downtime and an increase in overall system efficiency were observed. The integration of collaborative robots enables safe and efficient interaction with human operators, while AI supports fast and reliable decision-making in real time.

Key words: collaborative robots; artificial intelligence; welding; process optimization

1. UVOD

Savremena industrija prolazi kroz intenzivnu digitalnu transformaciju zasnovanu na konceptu Industrije 4.0, pri čemu se proizvodni procesi sve više oslanjaju na integraciju cyber-fizičkih sistema (CPS), Interneta stvari (IoT), industrijskog Interneta stvari (IIoT), robotskih sistema, umjetne inteligencije (AI), mašinskog učenja (ML), velikih skupova podataka (Big Data) i digitalnih blizanaca. Integracijom navedenih tehnologija omogućeno je kontinuirano prikupljanje i analiza podataka u realnom vremenu, što doprinosi povećanju produktivnosti, kvaliteta i fleksibilnosti proizvodnih sistema [1,2]. Jedan od važnih procesa u industriji jeste robotsko zavarivanje, koje predstavlja osnovu proizvodnje velikog broja konstrukcionih sklopova. Visoki zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva, ponovljivošću procesa i povećanjem proizvodne efikasnosti uslovili su razvoj inteligentnih robotskih ćelija za zavarivanje u kojima su industrijski roboti, kolaborativni roboti, senzorski sistemi i algoritmi umjetne inteligencije integrisani u jedinstveno proizvodno okruženje. Takve pametne ćelije omogućavaju adaptivno upravljanje procesom zavarivanja, automatsko podešavanje tehnoloških parametara i kontinuirano praćenje kvaliteta zavara u realnom vremenu [3,4,5,6]. Primjena dubokog učenja, računarskog vida i metoda mašinskog učenja omogućava pouzdano prepoznavanje defekata, praćenje penetracije zavara i prediktivnu procjenu kvaliteta, čime se značajno povećavaju produktivnost i pouzdanost proizvodnih sistema [5,6].

Posebno značajnu ulogu imaju kolaborativni roboti, koji zahvaljujući ugrađenim sigurnosnim funkcijama mogu sigurno sarađivati sa operaterima bez potrebe za potpunim fizičkim odvajanjem radnog prostora. Njihova primjena omogućava veću fleksibilnost proizvodnje, jednostavnije programiranje i brzu prilagodbu različitim proizvodnim zadacima, što je posebno važno kod proizvodnje manjih serija i čestih promjena modela proizvoda [7,8]. Razvoj umjetne inteligencije dodatno unapređuje mogućnosti robotskog zavarivanja. Primjenom metoda mašinskog učenja, dubokih neuronskih mreža i računarskog vida moguće je optimizirati parametre zavarivanja, predvidjeti pojavu defekata, pratiti stabilnost električnog luka te automatski vršiti inspekciju zavarenih spojeva. Prediktivno praćenje kvaliteta zavarenih spojeva primjenom mašinskog učenja postaje jedan od ključnih elemenata pametnih proizvodnih sistema. Integracija AI algoritama sa robotskim sistemima omogućava razvoj adaptivnih sistema koji u realnom vremenu prilagođavaju proces promjenama radnih uslova i time povećavaju kvalitet, pouzdanost i ekonomičnost proizvodnje [9–12,13].

2. PAMETNE ĆELIJE ZA ZAVARIVANJE U INDUSTRIJI 4.0

2.1. Industrijski i kolaborativni roboti za zavarivanje

Tradicionalni industrijski roboti za zavarivanje odlikuju se velikom nosivošću, visokom brzinom kretanja i izuzetnom ponovljivošću pozicioniranja, zbog čega se primjenjuju u proizvodnji velikih serija proizvoda. Najčešće se koriste robotski sistemi ABB, FANUC, KUKA, Motoman i Kawasaki, koji omogućavaju izvođenje MIG/MAG, TIG, laserskog i tačkastog zavarivanja. Njihova osnovna prednost ogleda se u visokoj produktivnosti, stabilnosti procesa uz minimalna odstupanja kvaliteta zavarenih spojeva.

Posljednjih godina intenzivno raste primjena kolaborativnih robota za zavarivanje, posebno u proizvodnji malih i srednjih serija te u fleksibilnim proizvodnim sistemima. Za razliku od klasičnih industrijskih robota, kolaborativni roboti projektovani su za siguran rad u neposrednoj blizini čovjeka. Integrisani senzori sile i momenta, sistemi za detekciju sudara i napredne sigurnosne funkcije omogućavaju saradnju operatera i robota u istom radnom prostoru bez potrebe za potpunim fizičkim odvajanjem ćelije. Primjena kolaborativnih robota posebno je značajna kod zavarivanja složenih konstrukcija, prototipova i proizvoda koji zahtijevaju česte promjene proizvodnog programa. Operater priprema i pozicionira radni komad, dok robot izvodi precizne operacije zavarivanja, čime se povećava produktivnost, poboljšava ergonomija rada i smanjuje fizičko opterećenje zaposlenih. Ovakav koncept predstavlja jedno od osnovnih obilježja Industrije 4.0, gdje čovjek i robot zajednički učestvuju u proizvodnom procesu. Poređenje performansi industrijskih i kolaborativnih robota za zavarivanje prikazano je u tabeli 1.

Tabela 1. Poređenje industrijskih i kolaborativnih robota za zavarivanje.

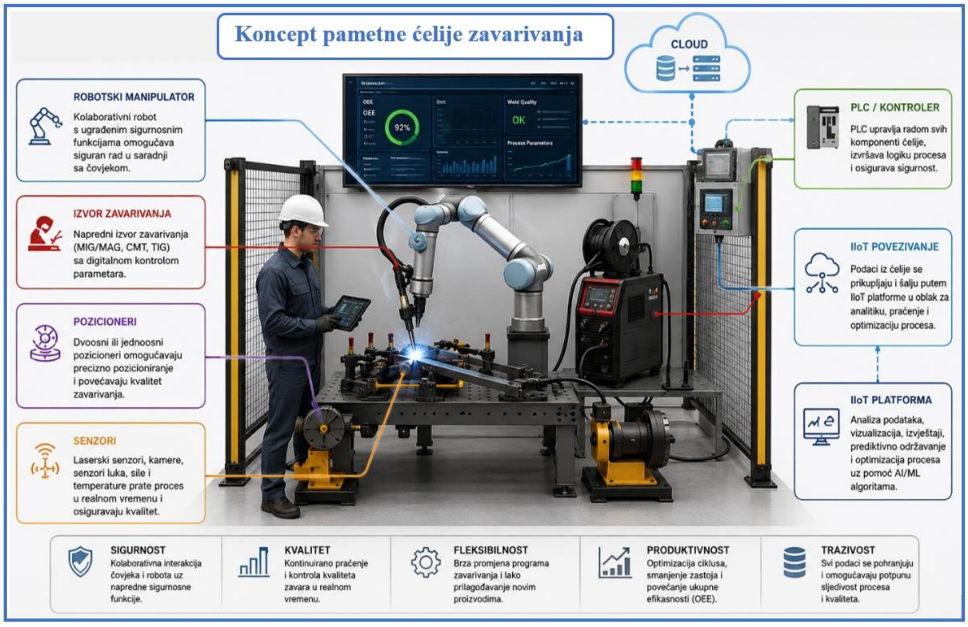
Karakteristika	Industrijski robot	Kolaborativni robot
Nosivost	Visoka (10–500 kg)	Mala do srednja (3–35 kg)
Brzina rada	Vrlo visoka	Srednja
Sigurnost	Zaštitna ograda	Rad sa operaterom
Programiranje	Složeno	Jednostavno
Fleksibilnost	Srednja	Visoka
Male serije	Ograničeno	Veoma pogodno
AI integracija	Da	Da
Primjena u zavarivanju	Velike serije	Male i srednje serije, prilagodljiva proizvodnja

Analiza globalnih trendova pokazuje da se broj instaliranih kolaborativnih robota kontinuirano povećava. Posebno je izražen rast njihove primjene u automobilskoj industriji, gdje se koriste za zavarivanje, montažu, rukovanje materijalom i završne proizvodne operacije. Ovaj trend potvrđuje da kolaborativna robotika postaje jedan od ključnih elemenata razvoja pametnih ćelija za zavarivanje i inteligentnih proizvodnih sistema budućnosti.

2.2. Koncept pametne ćelije za zavarivanje

Pametne ćelije za zavarivanje predstavljaju jedan od najznačajnijih primjera implementacije koncepta Industrije 4.0 u savremenoj proizvodnji. Njihova osnovna karakteristika jeste integracija robotskih sistema, digitalnih tehnologija, inteligentnih senzora, programabilnih logičkih kontrolera (PLC), industrijskog Interneta stvari (IIoT) i algoritama umjetne inteligencije u jedinstveno proizvodno okruženje koje omogućava autonomno upravljanje procesom zavarivanja u realnom vremenu. Za razliku od konvencionalnih robotskih ćelija, pametne ćelije omogućavaju kontinuirano prikupljanje podataka, analizu procesa i adaptivno podešavanje tehnoloških parametara s ciljem povećanja kvaliteta zavarenih spojeva, produktivnosti i fleksibilnosti proizvodnje. Osnovu pametne ćelije čini kolaborativni robotski manipulator, koji izvodi operacije zavarivanja u saradnji s operaterom. Zahvaljujući ugrađenim senzorima sile i momenta, sistemima za detekciju sudara i naprednim sigurnosnim funkcijama, kolaborativni robot može sigurno raditi u neposrednoj blizini čovjeka bez potrebe za potpunim fizičkim odvajanjem radnog prostora. Takav oblik saradnje omogućava da robot preuzme ponavljajuće i zahtjevne operacije zavarivanja, dok operater obavlja pripremu dijelova, nadzor procesa i završnu kontrolu kvaliteta [14,15]. Izvor struje za zavarivanje predstavlja centralni tehnološki element ćelije i najčešće se zasniva na digitalno upravljanim MIG/MAG, TIG ili CMT sistemima. Savremeni izvori omogućavaju automatsko podešavanje parametara kao što su struja, napon, brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja u zavisnosti od geometrije spoja, vrste materijala i informacija dobijenih sa senzora. Integracijom izvora

zavarivanja sa sistemima umjetne inteligencije moguće je ostvariti adaptivnu kontrolu procesa, čime se smanjuje vjerovatnoća nastanka poroznosti, nedovoljne penetracije i drugih grešaka zavarenog spoja [16]. Sastavni dio pametne ćelije čine i pozicioneri, koji omogućavaju optimalno pozicioniranje radnog komada tokom procesa zavarivanja. Primjenom jednoosnih ili dvoosnih servo pozicionera postiže se održavanje optimalnog položaja zavarenog spoja, čime se poboljšava stabilnost procesa, povećava kvalitet zavara i smanjuje ukupno vrijeme proizvodnog ciklusa. Sinhronizacija rada robota i pozicionera odvija se preko centralnog upravljačkog sistema, čime se ostvaruje potpuno koordinisano višekoordinatno kretanje svih komponenti ćelije.



Izvor: Vlastita elobaracija autora

Slika 1. Koncept pametne ćelije za zavarivanje u Industriji 4.0

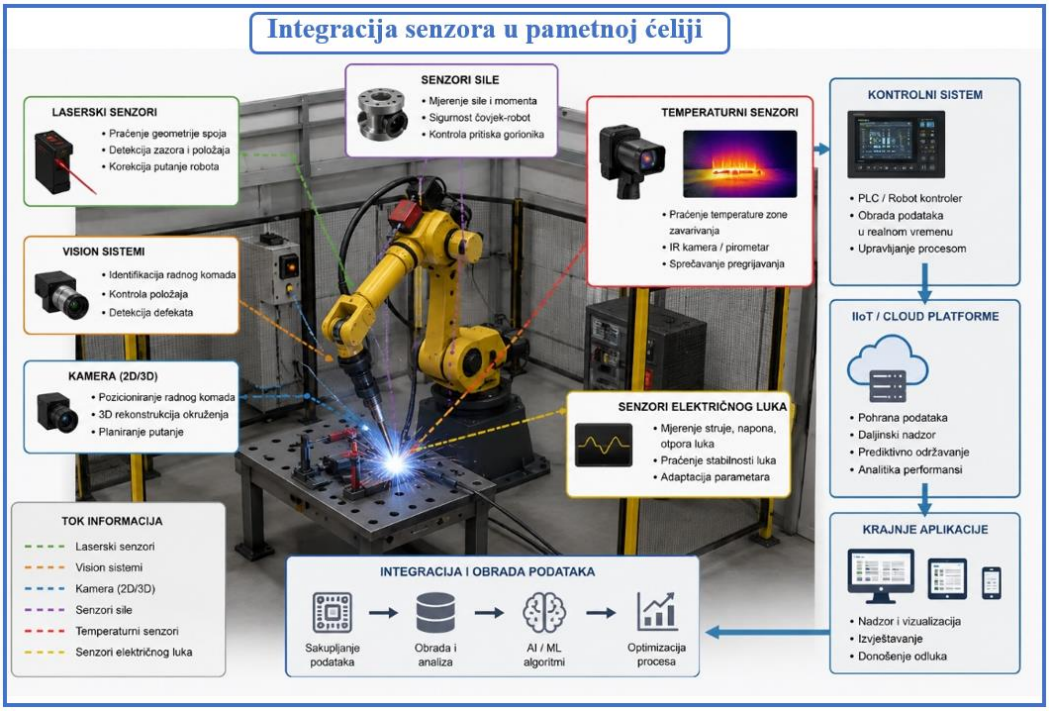
Posebno važnu ulogu imaju inteligentni senzorski sistemi, koji omogućavaju kontinuirano praćenje procesa zavarivanja. U praksi se koriste laserski senzori za praćenje spoja (seam tracking), industrijske kamere za računarski vid, senzori električnog luka, temperaturni senzori, senzori sile i momenta, kao i 3D vizuelni sistemi. Prikupljeni podaci obrađuju se primjenom algoritama mašinskog učenja i dubokog učenja radi automatskog prepoznavanja odstupanja, predviđanja defekata i optimizacije tehnoloških parametara procesa [16]. Upravljanje svim komponentama ćelije ostvaruje se pomoću PLC kontrolera, koji koordinira rad robota, izvora zavarivanja, pozicionera, sigurnosnih sistema i senzora. PLC omogućava izvršavanje unaprijed definisanih sekvenci rada, razmjenu podataka sa robotskim kontrolerom, kao i komunikaciju sa višim informacionim sistemima proizvodnje putem industrijskih komunikacionih protokola, kao što su PROFINET, EtherCAT, EtherNet/IP i OPC UA. Važan element savremene pametne ćelije predstavlja Industrial Internet of Things (IIoT). Svi procesni podaci prikupljeni tokom zavarivanja prenose se putem industrijske komunikacione mreže prema lokalnom serveru ili cloud platformi, gdje se vrši njihova analiza, arhiviranje i vizualizacija. Integracijom IIoT tehnologije omogućava se razvoj digitalnog blizanca proizvodne ćelije, prediktivno održavanje opreme, analiza ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI), optimizacija proizvodnje i donošenje odluka zasnovanih na podacima u realnom vremenu [15,17].

Arhitektura prikazana na Slici 1. ilustruje međusobnu povezanost svih komponenti pametne ćelije za zavarivanje. Centralnu ulogu ima kolaborativni robot koji izvodi operacije zavarivanja uz podršku inteligentnih senzora i sistema umjetne inteligencije, dok PLC

kontroler koordinira rad svih uređaja. Istovremeno, IIoT platforma omogućava kontinuirano prikupljanje i analizu procesnih podataka, čime se ostvaruje adaptivna optimizacija proizvodnog procesa, povećava kvalitet zavarenih spojeva i unapređuje ukupna efikasnost proizvodnje. Ovakva arhitektura predstavlja osnovu razvoja inteligentnih proizvodnih sistema u skladu sa principima Industrije 4.0 i predstavlja prelaz prema humanocentričnim proizvodnim okruženjima Industrije 5.0 [14–17].

2.3. Senzorski sistemi u pametnim ćelijama za zavarivanje

Senzorski sistemi predstavljaju jednu od ključnih komponenti pametnih ćelija za zavarivanje u Industriji 4.0, jer omogućavaju kontinuirano praćenje procesa, automatsko prikupljanje podataka i adaptivno upravljanje parametrima zavarivanja u realnom vremenu. Integracijom različitih senzora sa industrijskim i kolaborativnim robotima postiže se veća preciznost, pouzdanost i kvalitet zavarenih spojeva, uz istovremeno smanjenje broja grešaka i zastoja u proizvodnji. Razvoj senzorske tehnologije, zajedno s umjetnom inteligencijom i računalnim vidom, omogućio je prelazak sa klasičnog programiranog zavarivanja na inteligentne sisteme koji mogu samostalno prepoznati promjene u radnom okruženju i prilagoditi tehnološke parametre procesa [18,19].



Izvor: Vlastita elobaracija autora

Slika 2. Integracija senzora u pametnoj ćeliji za zavarivanje u Industriji 4.0

Na Slici 2. prikazana je integracija laserskih senzora, vision sistema, industrijskih kamera, senzora sile, temperaturnih senzora i senzora električnog luka u pametnoj ćeliji za zavarivanje. Prikupljeni podaci obrađuju se putem PLC kontrolera, IIoT platforme i algoritama umjetne inteligencije, čime se omogućava adaptivno upravljanje procesom, prediktivno održavanje i optimizacija kvaliteta zavarivanja. Jedan od najvažnijih senzorskih sistema u robotskom zavarivanju predstavljaju laserski senzori, koji se koriste za praćenje geometrije spoja (seam tracking) i određivanje položaja zavarenih dijelova prije i tokom procesa zavarivanja.

Laserski skener projektuje lasersku liniju na površinu radnog komada, dok ugrađena kamera registruje njeno odstupanje i izračunava tačnu geometriju spoja. Na osnovu tih

podataka robotski kontroler automatski koriguje putanju robota, čime se postiže veća preciznost zavarivanja i smanjuje mogućnost pojave defekata. Posebno značajnu ulogu imaju vision sistemi, koji se zasnivaju na primjeni industrijskih kamera i algoritama računarskog vida. Vision sistemi omogućavaju automatsku identifikaciju radnih komada, kontrolu njihovog položaja, detekciju zazora između elemenata, praćenje kvaliteta zavarenog spoja i završnu vizuelnu inspekciju. Primjenom metoda dubokog učenja moguće je automatski prepoznati površinske nedostatke, pukotine, poroznost i druge nepravilnosti, čime se značajno povećava pouzdanost sistema kontrole kvaliteta [19]. Industrijske kamere predstavljaju osnovni element vision sistema i najčešće se koriste u 2D i 3D konfiguraciji. Visokorezolucijske CMOS kamere omogućavaju precizno određivanje položaja radnog komada, dok stereo i 3D kamere generišu trodimenzionalni model radnog prostora koji robot koristi za planiranje putanje i adaptivno upravljanje procesom zavarivanja. Kombinacijom kamera sa umjetnom inteligencijom moguće je ostvariti automatsko prepoznavanje tipa spoja, optimizaciju položaja gorionika i kontrolu kvaliteta bez intervencije operatera. Kod kolaborativnih robota važnu ulogu imaju senzori sile i momenta, koji omogućavaju sigurnu saradnju čovjeka i robota u zajedničkom radnom prostoru. Ovi senzori registruju kontaktne sile između robota i okoline te omogućavaju trenutno zaustavljanje ili korekciju kretanja u slučaju neočekivanog kontakta. Osim sigurnosne funkcije, senzori sile koriste se i za adaptivno održavanje optimalnog pritiska gorionika ili alata tokom procesa zavarivanja, što doprinosi stabilnijem kvalitetu zavarenog spoja. Temperaturni senzori koriste se za kontinuirano praćenje raspodjele toplote u zoni zavarivanja. Mjerenjem temperature osnovnog i dodatnog materijala moguće je pravovremeno korigovati parametre procesa kako bi se spriječilo pregrijavanje, deformacije ili pojava neželjenih metalurških promjena. U savremenim sistemima često se primjenjuju infracrvene (IR) kamere i pirometri koji omogućavaju bez kontaktno mjerenje temperature u realnom vremenu. Važan izvor informacija predstavljaju i senzori električnog luka, koji kontinuirano mjere struju, napon i druge električne karakteristike procesa zavarivanja. Analizom ovih signala moguće je pratiti stabilnost električnog luka, otkriti nepravilnosti u procesu i automatski prilagoditi parametre zavarivanja. Integracijom ovih senzora sa algoritmima mašinskog učenja moguće je razviti inteligentne sisteme za predikciju defekata i optimizaciju procesa u realnom vremenu, čime se povećava kvalitet zavarenih spojeva i smanjuju troškovi proizvodnje [20]. Primjena laserskih senzora, vision sistema, industrijskih kamera, senzora sile, temperaturnih senzora i senzora električnog luka omogućava razvoj inteligentnih robotskih ćelija za zavarivanje koje karakterišu visok stepen autonomije, adaptivnosti i pouzdanosti. Integracijom ovih senzorskih sistema sa PLC kontrolerima, IIoT platformama i algoritmima umjetne inteligencije ostvaruje se kontinuirano praćenje procesa, prediktivna analiza i optimizacija proizvodnje, što predstavlja jedno od osnovnih obilježja pametne proizvodnje u okviru Industrije 4.0.

3. PRIMJENA UMJETNE INTELIGENCIJE U PAMETNIM ĆELIJAMA ZA ZAVARIVANJE

3.1. Machine Learning

Primjena Machine Learning (ML) algoritama predstavlja jedan od najvažnijih pravaca razvoja pametnih ćelija za zavarivanje u Industriji 4.0. Za razliku od konvencionalnih robotskih sistema, kod kojih se parametri zavarivanja unaprijed definišu, ML modeli omogućavaju analizu velikih količina procesnih podataka i automatsko prilagođavanje tehnoloških parametara u realnom vremenu. Na osnovu podataka prikupljenih sa senzora, kamera, laserskih skenera i izvora struje za zavarivanje, algoritmi uče međusobne zavisnosti između ulaznih parametara i kvaliteta zavarenog spoja, čime se povećavaju produktivnost, pouzdanost i stabilnost procesa [20]. Jedna od najznačajnijih primjena mašinskog učenja odnosi se na

optimizaciju parametara zavarivanja. ML algoritmi analiziraju parametre kao što su jačina struje, napon, brzina zavarivanja, brzina dodavanja žice, dužina električnog luka i protok zaštitnog plina, te određuju njihovu optimalnu kombinaciju za različite materijale i geometrije spojeva. Time se smanjuje broj eksperimentalnih ispitivanja, skraćuje vrijeme podešavanja proizvodnje i postiže veća ponovljivost procesa. Savremeni modeli zasnovani na neuronskim mrežama, Random Forest i Support Vector Machine algoritmima pokazali su visoku tačnost pri određivanju optimalnih procesnih parametara i adaptivnom upravljanju robotskim zavarivanjem [21].

Druga važna primjena odnosi se na predikciju kvaliteta zavarenih spojeva. Korištenjem podataka dobijenih sa vision sistema, temperaturnih senzora, senzora električnog luka i drugih procesnih senzora moguće je razviti modele koji u realnom vremenu procjenjuju kvalitet zavara bez potrebe za destruktivnim ispitivanjima. Na osnovu naučenih obrazaca ML algoritmi mogu predvidjeti karakteristike kao što su penetracija, širina zavara, čvrstoća spoja i geometrija zavarenog spoja, čime se omogućava pravovremena korekcija procesa i smanjuju troškovi kontrole kvaliteta [22].

Integracijom Machine Learning algoritama sa kolaborativnim robotima, senzorskim sistemima, PLC kontrolerima i IIoT platformama ostvaruju se inteligentne ćelije za zavarivanje koje mogu samostalno optimizovati proces, predvidjeti kvalitet zavarenih spojeva i otkriti potencijalne defekte u realnom vremenu. Takvi sistemi predstavljaju osnovu razvoja autonomnih proizvodnih ćelija i jedan su od ključnih elemenata digitalne transformacije proizvodnje u okviru Industrije 4.0 i Industrije 5.0.

3.2. Deep Learning i Computer Vision

Razvoj Deep Learning algoritama i Computer Vision tehnologija značajno je unaprijedio automatizaciju i inteligenciju pametnih ćelija za zavarivanje. Za razliku od klasičnih metoda obrade slike, koje zahtijevaju ručno definisanje karakteristika objekata, algoritmi dubokog učenja samostalno uče relevantne obrasce iz velikih skupova podataka. Integracijom industrijskih kamera, 2D i 3D vision sistema te umjetne inteligencije omogućena je automatska analiza procesa zavarivanja, kontinuirano praćenje kvaliteta i donošenje odluka u realnom vremenu. Time se povećava pouzdanost proizvodnje, smanjuje broj defektnih proizvoda i omogućava adaptivno upravljanje robotskim zavarivanjem [23,24].

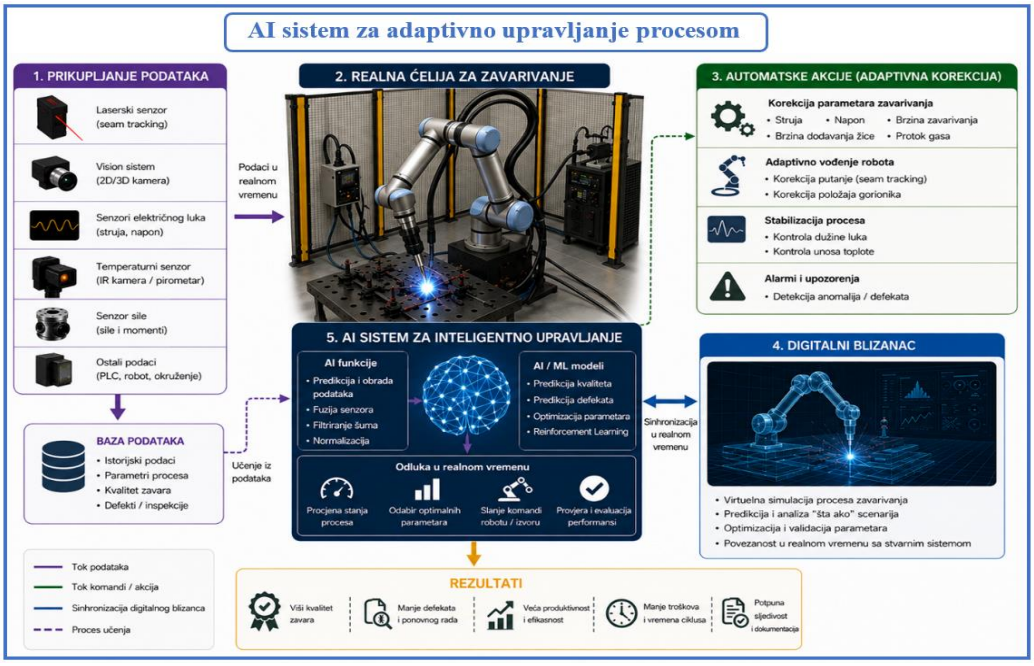
Jedna od najvažnijih primjena Deep Learning tehnologije jeste automatska detekcija grešaka zavarivanja. Korištenjem slika zavarenih spojeva prikupljenih industrijskim kamerama moguće je prepoznati površinske i unutrašnje defekte, kao što su poroznost, pukotine, zarezi od pregaranja, nedovoljna penetracija i nepravilnosti u geometriji zavara. Konvolucijske neuronske mreže (Convolutional Neural Networks – CNN) automatski izdvajaju karakteristične osobine slike i klasifikuju različite vrste defekata sa veoma visokom tačnošću, čime se značajno smanjuje potreba za manuelnom vizuelnom kontrolom i povećava efikasnost sistema kontrole kvaliteta [23].

Pored detekcije grešaka, Deep Learning omogućava i analizu zavarenih spojeva tokom samog procesa zavarivanja. Analizom slike električnog luka, zavarivačke kupke i zone uticaja toplote moguće je procijeniti stabilnost procesa, širinu i dubinu zavara, kao i pravovremeno otkriti odstupanja od zadanih tehnoloških parametara. Savremeni modeli zasnovani na algoritmu YOLO (You Only Look Once) omogućavaju detekciju i lokalizaciju objekata u realnom vremenu, zbog čega se uspješno primjenjuju za praćenje položaja gorionika, geometrije spoja i pojave nepravilnosti tokom robotskog zavarivanja. Njihova velika brzina obrade omogućava trenutno reagovanje sistema i adaptivnu korekciju putanje robota [24]. Najnoviji pravac razvoja predstavljaju modeli zasnovani na arhitekturi Vision Transformer (ViT), koji koriste mehanizme pažnje (attention mechanism) za analizu cijele slike umjesto lokalnih karakteristika. U poređenju sa klasičnim CNN modelima, Vision Transformer

ostvaruje bolje rezultate kod složenih oblika zavarenih spojeva, promjenljivih uslova osvjetljenja i različitih vrsta materijala. Integracijom CNN, YOLO i Vision Transformer algoritama sa kolaborativnim robotima, PLC kontrolerima i IIoT platformama razvijaju se inteligentne ćelije za zavarivanje sposobne za autonomnu inspekciju, adaptivno upravljanje procesom i kontinuirano unapređenje kvaliteta proizvodnje, što predstavlja jedno od ključnih obilježja pametne proizvodnje u Industriji 4.0 i Industriji 5.0 [23–25].

3.3. AI za adaptivno upravljanje procesom

Primjena umjetne inteligencije (Artificial Intelligence – AI) u pametnim ćelijama za zavarivanje omogućava razvoj adaptivnih sistema koji mogu samostalno pratiti stanje procesa, analizirati prikupljene podatke i u realnom vremenu donositi odluke o optimalnom načinu izvođenja zavarivanja. Za razliku od konvencionalnih robotskih sistema, kod kojih su svi tehnološki parametri unaprijed definisani, AI sistemi kontinuirano obrađuju podatke prikupljene sa laserskih senzora, vision sistema, temperaturnih senzora i senzora električnog luka te automatski prilagođavaju radne parametre u skladu sa promjenama u radnom okruženju. Na taj način povećavaju se kvalitet zavarenih spojeva, produktivnost i pouzdanost proizvodnog procesa [24].



Izvor: Vlastita elobaracija autora

Slika 3. AI sistem za inteligentno adaptivno upravljanje procesom robotskog zavarivanja

Na Slici 3. prikazana je arhitektura sistema umjetne inteligencije za adaptivno upravljanje procesom robotskog zavarivanja. Podaci prikupljeni sa senzora obrađuju se primjenom AI algoritama, koji omogućavaju automatsku korekciju parametara zavarivanja, adaptivno vođenje robota i sinhronizaciju sa digitalnim blizancem u realnom vremenu. Jedna od najvažnijih primjena AI odnosi se na automatsku korekciju parametara zavarivanja. Algoritmi umjetne inteligencije analiziraju promjene struje, napona, brzine zavarivanja, položaja gorionika, temperature i drugih procesnih veličina te na osnovu prethodno naučenih modela određuju optimalne vrijednosti za nastavak procesa. Ukoliko dođe do odstupanja zbog promjene geometrije spoja, tolerancija materijala ili nestabilnosti električnog luka, sistem automatski koriguje parametre bez zaustavljanja proizvodnje. Time se smanjuje broj neispravnih proizvoda, povećava ponovljivost procesa i skraćuje vrijeme proizvodnog ciklusa.

AI ima značajnu ulogu i u adaptivnom vođenju robota. Integracijom podataka dobijenih iz vision sistema, laserskih skenera i senzora sile robotski kontroler kontinuirano prilagođava putanju kretanja robota stvarnim uslovima rada. Ovakav pristup omogućava precizno praćenje spoja (seam tracking), automatsku kompenzaciju odstupanja položaja radnog komada i stabilno izvođenje zavarivanja čak i kod složenih geometrija ili promjenljivih proizvodnih uslova. Adaptivno upravljanje posebno je značajno kod kolaborativnih robota koji rade u neposrednoj blizini operatera, jer istovremeno povećava sigurnost i fleksibilnost proizvodnog sistema. Savremene pametne ćelije sve češće koriste koncept digitalnog blizanca (Digital Twin), kojim se uspostavlja virtualni model robotske ćelije povezan sa stvarnim proizvodnim procesom u realnom vremenu. Digitalni blizanac omogućava simulaciju procesa zavarivanja, optimizaciju parametara, predviđanje mogućih odstupanja i testiranje novih proizvodnih scenarija prije njihove primjene u stvarnom sistemu. Integracijom umjetne inteligencije, digitalnog blizanca, PLC kontrolera i IIoT platformi razvijaju se autonomne proizvodne ćelije sposobne za kontinuiranu optimizaciju procesa, prediktivno održavanje i inteligentno donošenje odluka, što predstavlja jedno od ključnih obilježja Industrije 4.0 [26].

4. PREDNOSTI I NEDOSTATCI PAMETNIH ĆELIJA ZA ZAVARIVANJE

Primjena pametnih ćelija za zavarivanje zasnovanih na umjetnoj inteligenciji, kolaborativnim robotima i naprednim senzorskim sistemima predstavlja značajan iskorak u odnosu na konvencionalne automatizovane ćelije. Integracijom AI algoritama, računarskog vida, IIoT platformi i adaptivnog upravljanja omogućava se kontinuirana optimizacija procesa zavarivanja, povećanje produktivnosti, poboljšanje kvaliteta proizvoda i efikasnije korištenje proizvodnih resursa. Za razliku od klasičnih sistema, kod kojih se parametri procesa unaprijed definišu i rijetko mijenjaju, pametne ćelije kontinuirano analiziraju podatke sa senzora i automatski prilagođavaju radne parametre stvarnim uslovima proizvodnje. Jedna od najvažnijih prednosti odnosi se na povećanje produktivnosti. Primjenom umjetne inteligencije i adaptivnog upravljanja smanjuje se vrijeme podešavanja proizvodnog procesa, broj prekida rada i potreba za ručnim intervencijama operatera. Istovremeno, automatska optimizacija putanje robota i tehnoloških parametara doprinosi skraćenju vremena ciklusa, čime se povećava broj proizvedenih zavarenih konstrukcija u jedinici vremena. Pametne ćelije ostvaruju značajno unapređenje kvaliteta zavarenih spojeva zahvaljujući kontinuiranom nadzoru procesa primjenom vision sistema, laserskih senzora, temperaturnih senzora i algoritama mašinskog i dubokog učenja. Automatska detekcija odstupanja i pravovremena korekcija parametara smanjuju pojavu poroznosti, pukotina, podreza i drugih defekata, čime se povećava pouzdanost proizvoda i smanjuju troškovi dorade i kontrole kvaliteta [26-29]. Značajan doprinos ostvaruje se i u oblasti sigurnosti i fleksibilnosti proizvodnje. Kolaborativni roboti opremljeni senzorima sile i naprednim sigurnosnim funkcijama omogućavaju siguran rad u zajedničkom prostoru sa operaterima, dok adaptivni AI algoritmi omogućavaju brzu promjenu proizvodnih zadataka bez složenog ponovnog programiranja robota. Takva fleksibilnost posebno je važna u maloserijskoj i prilagodljivoj proizvodnji. Pored toga, inteligentno upravljanje procesom doprinosi racionalnijem korištenju energije. Optimizacijom brzine zavarivanja, električnih parametara i vremena rada opreme smanjuje se potrošnja energije, dok se kroz prediktivno održavanje povećava raspoloživost sistema i ukupna efikasnost proizvodnje. Sve navedene prednosti odražavaju se na povećanje ukupne efikasnosti opreme (Overall Equipment Effectiveness – OEE) na vrijednosti od 80-90%, u poređenju sa klasičnom proizvodnom ćelijom kod koje OEE iznosi 60-70%.

Uprkos značajnom napretku u primjeni umjetne inteligencije i kolaborativne robotike, razvoj pametnih ćelija za zavarivanje suočava se sa brojnim tehničkim i sigurnosnim izazovima. Jedan od najvažnijih izazova odnosi se na sigurnost AI sistema. Algoritmi mašinskog i dubokog učenja moraju donositi pouzdane odluke u realnom vremenu, pri čemu

je neophodno osigurati stabilnost rada i mogućnost objašnjenja odluka koje AI sistem donosi. Posebnu pažnju treba posvetiti validaciji AI modela i njihovoj sigurnoj integraciji sa robotskim upravljačkim sistemima kako bi se izbjegle greške koje mogu uticati na kvalitet proizvoda ili sigurnost operatera. Drugi veliki izazov predstavlja cyber security industrijskih sistema. Povezivanjem robota, PLC kontrolera, senzora, cloud platformi i MES sistema povećava se rizik od cyber napada, neovlaštenog pristupa i gubitka podataka. Zbog toga savremene pametne ćelije zahtijevaju primjenu naprednih sigurnosnih mehanizama, enkripcije komunikacije, autentifikacije korisnika i kontinuiranog nadzora mrežne infrastrukture. Važan pravac razvoja predstavlja Edge AI, koji omogućava izvršavanje algoritama umjetne inteligencije direktno na industrijskim računarima ili robotskim kontrolerima, bez potrebe za slanjem svih podataka u cloud. Time se smanjuje vrijeme odziva sistema, povećava pouzdanost rada i omogućava donošenje odluka u realnom vremenu čak i u uslovima ograničene mrežne povezanosti. Sve značajniju ulogu ima i koncept Digital Twin, koji omogućava razvoj virtualnog modela proizvodne ćelije sinhronizovanog sa stvarnim sistemom. Digitalni blizanac koristi se za simulaciju procesa, optimizaciju parametara, testiranje novih proizvodnih scenarija i prediktivno održavanje bez prekida proizvodnje. Istovremeno, razvoj generativne umjetne inteligencije otvara mogućnost automatskog programiranja robota, generisanja optimalnih putanja zavarivanja, analize proizvodnih podataka i inteligentne podrške operaterima pri donošenju odluka. U budućnosti se očekuje intenzivnija primjena humanoidnih robota, koji će zahvaljujući naprednim AI algoritmima biti sposobni za izvođenje složenih montažnih i proizvodnih operacija u saradnji sa ljudima. Takav razvoj predstavlja jedan od ključnih pravaca Industrije 5.0, čiji je cilj uspostavljanje održive, fleksibilne i čovjeku orijentisane proizvodnje u kojoj umjetna inteligencija i robotika djeluju kao podrška ljudskim sposobnostima, a ne njihova zamjena.

5. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana primjena kolaborativnih robota, senzorskih sistema i umjetne inteligencije u razvoju pametnih ćelija za zavarivanje u okviru koncepata Industrije 4.0 i Industrije 5.0. Posebna pažnja posvećena je primjeni mašinskog učenja, dubokog učenja i računarskog vida u optimizaciji procesa zavarivanja, automatskoj detekciji defekata, predikciji kvaliteta i adaptivnom upravljanju robotskim sistemima. Analizirane su savremene tehnologije koje omogućavaju kontinuirano prikupljanje i obradu podataka, inteligentno donošenje odluka i optimizaciju proizvodnog procesa u realnom vremenu. Poseban doprinos rada predstavlja razvoj predloženog modela AI arhitekture pametne ćelije za zavarivanje, koji integriše industrijske i kolaborativne robote, napredne senzorske sisteme, AI server, PLC kontroler, cloud platformu i Manufacturing Execution System (MES) u jedinstvenu inteligentnu proizvodnu cjelinu. Predložena arhitektura omogućava kontinuiranu razmjenu podataka između svih komponenti sistema, automatsku analizu procesnih parametara, adaptivno upravljanje robotskim zavarivanjem i prediktivnu optimizaciju proizvodnje. Integracijom umjetne inteligencije sa robotskim sistemima moguće je povećati produktivnost, poboljšati kvalitet zavarenih spojeva, skratiti vrijeme proizvodnog ciklusa, smanjiti potrošnju energije i povećati ukupnu efikasnost proizvodnog sistema, uz istovremeno unapređenje sigurnosti i fleksibilnosti proizvodnje. Buduća istraživanja trebala bi biti usmjerena na razvoj Edge AI sistema za donošenje odluka u realnom vremenu, primjenu Digital Twin tehnologije za simulaciju i optimizaciju procesa, korištenje generativne umjetne inteligencije za automatsko programiranje i optimizaciju robotskih putanja, kao i integraciju humanoidnih robota u proizvodne sisteme Industrije 5.0. Poseban značaj imaće razvoj sigurnih i pouzdanih AI sistema sa naprednim mehanizmima cyber sigurnosti, koji će omogućiti širu industrijsku primjenu autonomnih i inteligentnih proizvodnih ćelija za zavarivanje.

LITERATURA

[1] Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Khan, I. H., & Suman, R. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. Sustainable Operations and Computers, 3, 203–217. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008

[2] Karabegović, I, Karabegović, E, Mahmić, M., Husak, E. (2020), The implementation of Industry 4.0 using industrial and service robots in production processes. IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2725-2.ch001

[3] Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. Journal of Manufacturing Systems, 61, 530–535. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006

[4] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. Sustainability, 11(16), 4371. https://doi.org/10.3390/su11164371

[5] Liu, T., Zheng, P., & Bao, J. (2023). Deep learning-based welding image recognition: A comprehensive review. Journal of Manufacturing Systems, 68, 601–625. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.026

[6] Yu, R., Cao, Y., Chen, H., Ye, Q., & Zhang, Y. M. (2023). Deep learning based real-time and in-situ monitoring of weld penetration: Where we are and what are needed revolutionary solutions? Journal of Manufacturing Processes, 93, 15–46. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.011

[7] Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review. Robotics, 8(4), 100. https://doi.org/10.3390/robotics8040100

[8] Keshvarparast, A., Azarkish, M., & Ahmadi, A. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: A systematic literature review. Journal of Intelligent Manufacturing, 35, 2065–2118. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w

[9] Othman, U., & Yang, E. (2023). Human–robot collaborations in smart manufacturing environments: Review and outlook. Sensors, 23(12), 5663. https://doi.org/10.3390/s23125663

[10] Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 18, 20–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002

[11] Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 150, 106889. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889

[12] Cherubini, A., & Navarro-Alarcon, D. (2021). Sensor-Based Control for Collaborative Robots: Fundamentals, Challenges, and Opportunities. Frontiers in Neurorobotics, 14, 576846. https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.576846

[13] Zhou, B., Pychynski, T., Reischl, M., Kharlamov, E., et al. (2022). Machine learning with domain knowledge for predictive quality monitoring in resistance spot welding. Journal of Intelligent Manufacturing, 33, 1139–1163. https://doi.org/10.1007/s10845-021-01892-y

[14] Cao, Y., Zhou, Q., Yuan, W., Ye, Q., Popa, D., & Zhang, Y. M. (2024). Human-robot collaborative assembly and welding: A review and analysis of the state of the art. Journal of Manufacturing Processes, 131, 1388–1403. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.044

[15]Baratta, A., Cimino, A., Gnoni, M. G., & Longo, F. (2023). Human Robot Collaboration in Industry 4.0: A literature review. Procedia Computer Science, 217, 1887–1895. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.389
[16]Bassir, D. (2023). Integration of the AI and ML Approaches for Prediction Analysis in Welding: Review. Advances in Transdisciplinary Engineering. https://doi.org/10.3233/ATDE230560
[17]Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., & Khatib, O. (2024). Progress and prospects of the human–robot collaboration. Autonomous Robots, 48, 1–30. https://doi.org/10.1007/s10514-024-10156-2
[18]Xu, Y., & Wang, Z. (2021). Visual sensing technologies in robotic welding: Recent research developments and future interests. Sensors and Actuators A: Physical, 320, 112551. https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112551
[19]Wang, B., Hu, S. J., Sun, L., & Freiheit, T. (2020). Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. Journal of Manufacturing Systems, 56, 373–391. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020
[20]Xu, F., Xu, Y., Zhang, H., & Chen, S. (2022). Application of sensing technology in intelligent robotic arc welding: A review. Journal of Manufacturing Processes, 79, 854–880. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.029
[21]Ali, R., El-Betar, A., & Magdy, M. (2024). A review on optimization of autonomous welding parameters for robotics applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134, 5065-5086 https://doi.org/10.1007/s00170-024-14396-9
[22]Xu, J., Liu, Q., Xu, Y., Xiao, R., Hou, Z., & Chen, S. (2024). Review on the Application of the Attention Mechanism in Sensing Information Processing for Dynamic Welding Processes. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8(1), 22. https://doi.org/10.3390/jmmp8010022
[23]Guo, Q., Yang, Z., Xu, J., Jiang, Y., Wang, W., Liu, Z., Zhao, W., & Sun, Y. (2024). Progress, challenges and trends on vision sensing technologies in automatic/intelligent robotic welding: State-of-the-art review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 89, 102767. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102767
[24]Wang, Z., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. M. (2024). The Active Visual Sensing Methods for Robotic Welding: Review, Tutorial, and Prospect. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 73, Article 5039319. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3485460
[25]Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779–788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91
[26] Kang, Y., & Chen, R. (2024). Welding robot automation technology based on digital twin. Frontiers in Mechanical Engineering, 10, 1367690. https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1367690
[27]Xu, Y., & Wang, Z. (2020). A review of vision-aided robotic welding. Computers in Industry, 123, 103326. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103326
[28]Kahnamouei, J. T., & Moallem, M. (2024). Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review. Ocean Engineering, 312, 119294. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294
[29]Chi, P., Wang, Z., Liao, H., Li, T., Wu, X., & Zhang, Q. (2024). Application of artificial intelligence in the new generation of underwater humanoid welding robots: A review. Artificial Intelligence Review, 57, 306. https://doi.org/10.1007/s10462-024-10940-x