

NAČRTOVANJE REGIJSKO SEGMENTIRANE ROBOTSKE POVRŠINSKE OBDELAVE Z BOLJ REALISTIČNO ČASOVNO METRIKO

Tomaž Pušnik, Aleš Hace

Izvleček:

Tradicionalni pristopi pri robotski površinski obdelavi pogosto temeljijo na vnaprej določeni konstantni smeri in hitrosti gibanja orodja, ne glede na lokalne značilnosti obdelovanca, kar vodi v neučinkovito izrabo robotskih zmogljivosti. V tej študiji predstavljamo metodo, ki temelji na regijski segmentaciji površine obdelovanca, kjer se za vsako regijo določita optimalna smer in hitrost obdelave na osnovi kinematične zmogljivosti robota in geometrije obdelovanca. Razvit je bil izboljšan indeks za oceno časa obdelave, ki vključuje penalizacijo zaradi prehodov med posameznimi obdelovalnimi potmi, ter nov postopek za iskanje optimalnega števila začetnih segmentov, kar omogoča bolj realistično oceno učinkovitosti načrtovanih poti. Eksperimentalni rezultati potrjujejo, da predlagani regijski pristop dosega do 22 % krajše čase obdelave v primerjavi s konvencionalno enosmerno strategijo.

Ključne besede:

robotska površinska obdelava, časovna optimizacija obdelave, sodelujoči roboti, regijska segmentacija, mikrokovanje

1 Uvod

V današnji industriji se proizvodni procesi vse bolj usmerjajo k izdelavi manjših serij z visoko stopnjo prilagodljivosti in raznolikosti izdelkov. Ta trend zahteva napredne rešitve, ki omogočajo hitro prilagajanje in optimizacijo proizvodnih ciklov. Sodelujoči roboti, zasnovani za varno in učinkovito interakcijo z operaterji, imajo osrednjo vlogo pri doseganju teh ciljev, saj združujejo prilagodljivost z visoko natančnostjo. Kljub njihovim prednostim pa se pri robotski površinski obdelavi kompleksnih površin pojavljajo izzivi, povezani z načrtovanjem optimalnih poti orodja, ki bi zagotavljale tako uspešno izvedljivost kot časovno učinkovitost. Ti izzivi so še posebej pri robotskem mikrokovanju [1], kjer pnevmatsko oz. elektromagnetno orodje s konico iz trde karbidne kroglice natančno udarja po površini obdelovanca z visoko frekvenco in s tem izboljšuje mehanske lastnosti materiala.

Za uspešno izvedbo tega postopka je ključnega pomena natančno in optimalno gibanje robota. Pri tradicionalnih pristopih z uporabo standardnih programov CAD/CAM se obdelava izvaja z enotno smerjo in konstantno hitrostjo, kar ne omogoča izkoriščanja kinematičnih zmogljivosti robota in geometrijskih lastnosti obdelovanca, zato se posledično lahko pojavijo neučinkovite poti orodja in daljši časi obdelave. Zaradi teh omejitev so bili razviti različni pristopi, ki temeljijo na segmentaciji površine v regije z bolj homogenimi lastnostmi. V literaturi so se pojavile metode, ki optimizirajo togost robota pri rezkanju [2] ali pa se izogibajo poškodbam obdelovanca pri brušenju [3]. V delu [4] prav tako s segmentacijo obdelovanca dosežejo pravilne varilne zveze, pri [5] pa z regijami omogočajo obdelavo večjih kipov.

Pomemben napredek na področju sinhroniziranega gibanja robotskih sistemov je predstavljen v [6], kjer je uporabljena razširjena inverzna Jacobijeva matrika za oceno efektivne manipulabilnosti robotske roke z upoštevanjem geometrije obdelovanca. Ta pristop omogoča sinhronizacijo translacijskih in rotacijskih gibanj orodja, pri čemer se šestdimenzionalni prostor gibanja projicira na dvodimenzionalno tangentno ravnino na površini obdelovanca. Rezultat je dvodimenzionalni hitrostni elipsoid, definiran z glavnima osema, pri čemer daljša os elipse

Tomaž Pušnik, mag., izr. prof. dr. Aleš Hace, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-3.01>

označuje smer, v kateri robot dosega višje hitrosti, krajša os pa smer z nižjimi hitrostmi. Takšna analiza omogoča natančnejše načrtovanje poti orodja, prilagojene kinematičnim zmožnostim robota.

V tem delu predstavimo izboljššan pristop k optimizaciji robotske površinske obdelave, ki temelji na segmentaciji površine obdelovanca in upošteva kinematične omejitve robota. Z uporabo algoritma strojnega učenja K-means [7] smo površino razdelili na regije s podobnimi kinematičnimi značilnostmi. Vsaka regija omogoča določitev optimalnih smeri in hitrosti obdelave, kar izboljšuje časovno učinkovitost in kakovost obdelave. Predstavljena je izboljšana metoda za oceno časa obdelave, ki vključuje časovno penalizacijo zaradi prehodov med obdelavo, saj je bilo ugotovljeno, da prepogosti prehodi, zlasti v regijah z velikim številom kratkih obdelovalnih poti, povzročajo znatne časovne izgube zaradi upočasnevanja in pospeševanja robota. Numerični in eksperimentalni preizkusi so bili izvedeni na sodelujočem robotu UR5e (slika 1), kar je omogočilo validacijo predlagane metode v realnih pogojih.

2 Metodologija

2.1 Iskanje optimalne obdelovalne smeri in hitrosti

Pri površinski obdelavi mora konica orodja slediti natančno določeni poti, ki leži na površini obdelovanca. Ta pot ni določena le s položajem, temveč tudi z orientacijo orodja, saj mora biti smer orodja usklajena s površinsko normalo – običajno je zahtevana pravokotna orientacija glede na lokalno ukrivljenost površine. Za določitev smeri gibanja, ki vodi do največje izvedljive hitrosti obdelave, za vsako točko površine P_i definiramo dvodimenzionalni smerni vektor v bazni ravnini:

$$u_2 = [\cos(\varphi) \quad \sin(\varphi)]^T \quad (1)$$

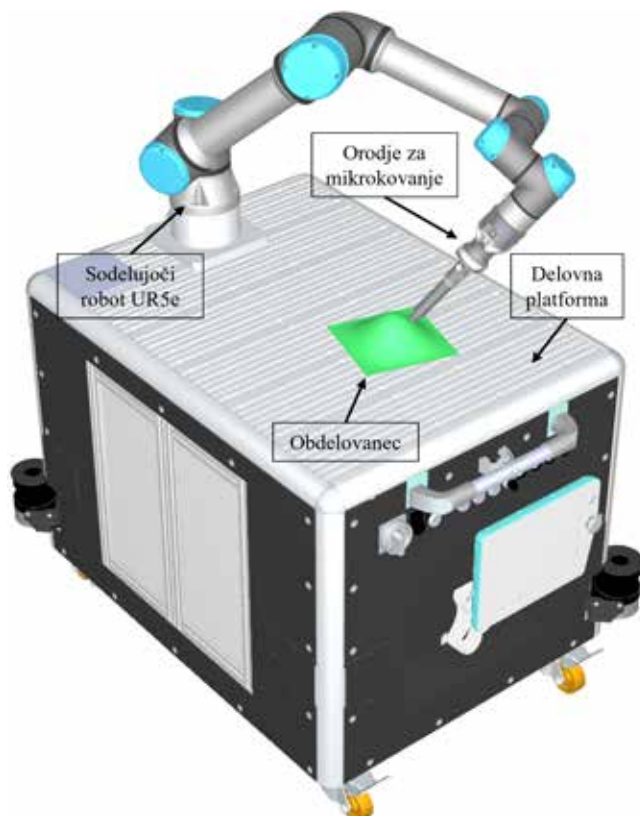
kjer je φ iskani kot zasuka. Ta vektor nato preslikamo v tridimenzionalni smerni vektor v tangentialni ravnini točke na površini obdelovanca z matriko S_v [6]:

$$u_T = \frac{S_v u_2}{\|S_v u_2\|} \quad (2)$$

Na tej osnovi za vsako točko obdelovanca izračunamo največjo izvedljivo linearno hitrost gibanja orodja v dani smeri:

$$V_{\max} = \frac{1}{\|J_C^\# \cdot u_T\|_\infty} \quad (3)$$

kjer $J_C^\#$ označuje razširjeno inverzno Jacobijevo matriko [6], ki vključuje kinematične omejitve robota in diferencialno geometrijo površine, u_T pa je smerni vektor (2). Hitrost v splošnem variira od toč-



Slika 1 : Fleksibilna delovna platforma s sodelujočim robotom UR5e, obdelovancem in orodjem za mikrokovanje

ke do točke: $V_{\max} = V_{\max}(P_i)$. Optimizacijski problem za določitev globalne optimalne smeri obdelave temelji na iskanju tiste smeri, ki maksimira najmanjšo izvedljivo hitrost med vsemi točkami obravnavane površine obdelovanca:

$$V_{\max}^{opt} = \max_{\varphi} \left(\min_{i=1, \dots, N} (V_{\max}(P_i)) \right) \quad (4)$$

pri čemer $V_{\max}^{opt}$ predstavlja največjo izvedljivo linearno hitrost na površini obdelovanca v optimalni smeri $u_2 = u_2(\varphi)$, N pa je število obravnavanih točk na površini. Z rešitvijo tega optimizacijskega problema pridobimo vektorsko polje hitrosti VVF (ang. Velocity Vector Field), ki podaja optimalne smeri in hitrosti obdelave na površini obdelovanca.

2.2 Regijska segmentacija obdelovanca

2.2.1 Segmentacijski vektor

Površine kompleksnih oblik praviloma vsebujejo območja z različno ukrivljenostjo in posledično različnimi kinematičnimi zmogljivostmi robotske obdelave. Ker optimalna smer in hitrost obdelave nista homogeni čez celotno površino, je smiselno površino razdeliti na regije s podobnimi lokalnimi značilnostmi. S tem pristopom lahko v vsaki regiji

izvajamo obdelavo po enotni smeri, ki je blizu lokalnemu optimumu. Za namen segmentacije priredimo t. i. segmentacijski vektor F , ki združuje geometrijske lastnosti obdelovanca, kot so položajni vektor P_p , enotski normalni vektor površine $\hat{n}_p$, ter minimalno in maksimalno ukrivljenost površine $\kappa_{\min,i}$ in $\kappa_{\max,i}$ [6]:

$$F = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}, \hat{n}_{ix}, \hat{n}_{iy}, \hat{n}_{iz}, \kappa_{\min,i}, \kappa_{\max,i}] \quad (5)$$

kjer smo upoštevali komponente vektorjev v Kartezijevem koordinatnem sistemu

$$P_i = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}]^T \text{ in } \hat{n}_i = [n_{ix}, n_{iy}, n_{iz}]^T$$

Za pretvorbo podatkov v standardizirano obliko je uporabljena normalizacija z Z-vrednostjo [8]:

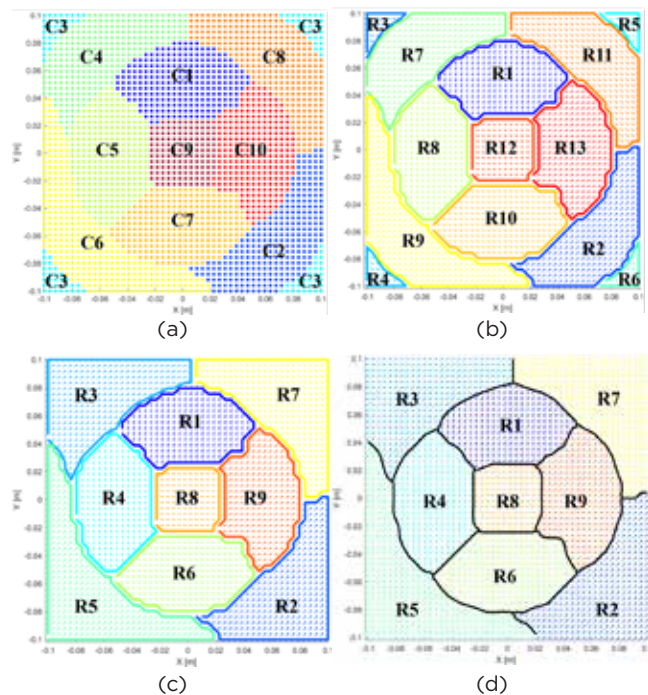
$$\tilde{F} = \frac{F_i - \mu}{s} \quad (6)$$

kjer $\tilde{F}$ predstavlja standardiziran segmentacijski vektor, μ povprečno vrednost podatkov, s pa standardni odklon.

Za segmentacijo podatkov je uporabljen algoritem strojnega učenja K-means, ki razvrsti množico točk v ločene gruče na osnovi podobnosti [7]. Vsaka točka je pripisana tisti gruči, katere težišče (center) ji je najbližje glede na izbrano metriko razdalje. Postopek se začne z inicializacijo centrov, nato pa algoritem iterativno izmenjuje dva koraka: (1) dodeljevanje podatkovnih točk najbližjemu centru in (2) posodabljanje centrov z izračunom povprečne vrednosti vseh točk v posamezni skupini. Iteracije se ponavljajo, dokler se centri ne stabilizirajo ali ni doseženo prednastavljeno največje število korakov.

2.2.2 Združevanje regij

Po začetni segmentaciji površine, kjer množico točk razvrstimo v segmente, ki izhajajo iz gruč C_p , lahko dobimo premajhne segmente, kar lahko negativno vpliva na stabilnost in uporabnost načrtovane poti (slika 2a). Zaradi tega najprej določimo jasne meje med segmenti in tako ustvarimo jasno definirane regije (slika 2b). V nadaljevanju uvedemo postopek združevanja, kjer vse regije pod določenim pragom površine združimo s sosednjimi in tako ustvarimo končne obdelovalne regije R_p . Rezultati so prikazani na sliki 2c, kjer je bilo začetno število 13 regij iz slike 2b zmanjšano na 9. Vsaka regija ima sprva svoje meje, kar povzroči podvajanja in vrzeli. Za rešitev tega se izračunajo sredinske točke med temi mejami, ki se nato zgladijo. Tako nastanejo enotni, gladki prehodi med regijami, kar izboljša natančnost obdelave (slika 2d).



Slika 2 : Proces regijske segmentacije: (a) začetno K-means segmentiranje, (b) regije z ustvarjenimi mejami, (c) združene regije, (d) končne regije, pripravljene za površinsko obdelavo. Puščice prikazujejo VVF – vektorsko polje hitrosti.

2.3 Ocena časa obdelave

Za oceno časa obdelave smo definirali osnovni indeks MTI (ang. Machining Time Index) [9], ki zagotavlja referenčno metriko za oceno na podlagi izračunanega $V_{\max}^{opt}$ (4) in gostote točk na obdelovancu:

$$\tau = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{V_{\max}^{opt}} \quad (8)$$

kjer τ predstavlja MTI indeks, d_i je standardna razdalja med točkami, N je število obravnavanih točk na površini, $V_{\max}^{opt}$ pa največja izvedljiva linearna hitrost v tangentni ravnini, pripeti na točko obdelovanca.

Vpeljani indeks MTI nudi uporabno metriko za oceno potencialne učinkovitosti robotske obdelave, vendar temelji zgolj na standardni razdalji in lokalno optimalnih hitrostih. V praksi pa lahko pri večjem številu majhnih regij in kratkih obdelovalnih poti pride do pomembnih izgub, ki izvirajo iz pogostih zausstavitvev in ponovnih pospeškov orodja pri prehodih med zaporednimi potmi. Te dinamične izgube niso zajete v osnovnem MTI in vodijo do sistematičnega podcenjevanja dejanskega časa obdelave. Za vsako regijo R_i se glede na izračunano optimalno smer obdelave in mejnih točk regij določi skupna dolžina projekcije v smeri, pravokotni na obdelovalno pot. Na podlagi razmika med potmi d_{step} se število po-

trebnih prehodov med obdelovalnimi potmi $N_{step}^{R_i}$ za posamezno regijo določi kot:

$$N_{step}^{R_i} = \frac{W_{R_i}}{d_{step}} - 1 \quad (9)$$

kjer W_{R_i} označuje širino regije R_i v smeri prečnih projekcij. Vsak prehod sestavljajo tri faze:

- ▶ prva faza je zaviranje iz trenutne obdelovalne hitrosti V_{max}^{opt} na hitrost prehoda v_{step} :

$$t_{dec} = \frac{V_{max}^{opt} - v_{step}}{a} \quad (10)$$

kjer a predstavlja pospešek orodja robota,

- ▶ druga faza je dejanski čas prehoda $t_{step} = d_{step} / v_{step}$,
- ▶ tretja faza pa je ponovno pospeševanje iz hitrosti prehoda v_{step} na obdelovalno hitrost V_{max}^{opt} s pospeškom a , kar rezultira v čas pospeševanja, ki je enak času zaviranja:

$$t_{acc} = \frac{V_{max}^{opt} - v_{step}}{a} \quad (11)$$

Skupni časovni pribitek za en prehod je:

$$\tau_{step} = t_{dec} + t_{step} + t_{acc} \quad (12)$$

Časovni pribitek zaradi prehodov za eno regijo dobimo tako, da seštejemo časovne pribitke pri vseh prehodih v regiji:

$$\tau_{step}^{R_i} = \sum_{i=1}^{N_{step}^{R_i}} \tau_{step,i} \quad (13)$$

Skupna časovna izguba za celoten obdelovanec je definirana kot τ_{step}^{wp} :

$$\tau_{step}^{wp} = \sum_{i=1}^{N_R} \tau_{step}^{R_i} \quad (14)$$

kjer je N_R število regij. Prilagojeni indeks za oceno časa obdelave EMTI (ang. Effective Machining Time Index) je seštevek obstoječega indeksa MTI (8) in dodatne časovne penalizacije zaradi prehodov (14):

$$\tau_{eff} = \tau + \tau_{step}^{wp} \quad (15)$$

2.4 Optimalno število segmentov

Pri načrtovanju regijsko prilagojene površinske obdelave ima odločitev o številu začetnih segmentov

pomemben vpliv na strukturo obdelovalnih poti in s tem na učinkovitost celotnega procesa. Premajhno število segmentov lahko vodi v regije z izrazito notranjo variabilnostjo, zaradi česar se optimalna obdelovalna smer znotraj regije ne more uskladiti z lokalnimi kinematičnimi značilnostmi. Nasprotno pa preveliko število segmentov povzroči številne kratke obdelovalne poti z veliko prehodi, kar zaradi dinamičnih izgub negativno vpliva na skupni čas obdelave. Zaradi tega je potrebno izvesti optimizacijo števila segmentov N_C , ki predstavlja vhodni parameter za *K-means* segmentacijo.

Po segmentaciji v segmente C_i ($i=1, \dots, N_C$) sledi postopek združevanja regij, kar vodi do obdelovalnih regij R_i ($i=1, \dots, N_R$), kjer je N_C število segmentov in N_R število končnih regij. Za določeno lego obdelovanca izvajamo iterativni postopek, v katerem za vsako število segmentov $N_C \in \{1, 2, \dots, C_{max}\}$, kjer je C_{max} maksimalno dovoljeno število segmentov, izvedemo:

- ▶ segmentacijo površine v N_C segmentov,
- ▶ razdelitev segmentov v ločene regije,
- ▶ izračun efektivnega indeksa časa obdelave τ_{eff} (N_C) in združevanje regij.

Cilj je določiti takšno vrednost N_C , pri kateri je indeks EMTI (τ_{eff}) minimalen:

$$\tau_{eff} = \min_{N_C \in \{1, \dots, C_{max}\}} \tau_{eff}(N_C) \quad (16)$$

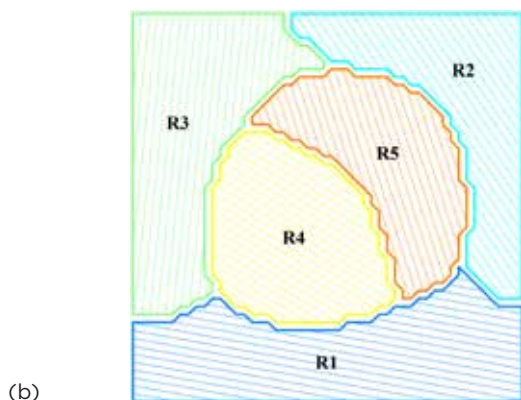
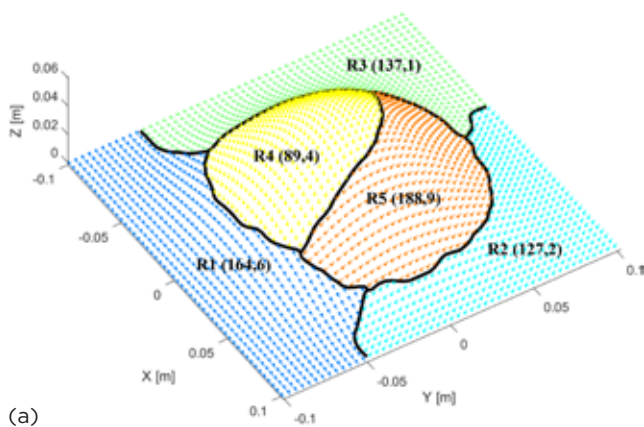
3 Študija primera

V tem poglavju predstavljamo rezultate, s katerimi ocenjujemo učinkovitost predlaganega pristopa regijsko prilagojene površinske obdelave v primerjavi s konvencionalno strategijo z enotno smerjo gibanja orodja po celotni površini obdelovanca. Obe strategiji temeljita na vzorcu paralelnih, dvostranskih gibanj po principu Zig-Zag, pri čemer so posamezne obdelovalne poti med seboj povezane z linearnimi ravnimi prehodi, kar zagotavlja enostavno izvedbo in enakomerno pokritost površine.

3.1 Regijska segmentacija obdelovanca

Za zagotovitev primerljivih pogojev med posameznimi preizkusi je bil ohranjen enak položaj obdelovanca v vseh testih. Obdelovanec je bil postavljen v položaj s koordinatami XYZ = [-46; -564,6; -96] (mm) glede na referenčni koordinatni sistem robota in rotiran okoli z-osi za 253°. Takšna nastavitve omogoča neposredno primerjavo rezultatov različnih strategij neodvisno od vpliva lege obdelovanca. Optimalno število segmentov za algoritem K-means je bilo izbrano po avtomatskem iterativnem postopku na $N_C = 5$, pri čemer je bil $C_{max} = 10$, saj so se v praksi višje vrednosti C_{max} izkazale za neučinkovite zaradi poslabšanja razmerja med dolžino poti in številom prehodov.

Po uvodnem segmentiranju smo identificirali in ciljali manjše regije za morebitno združitev, da bi izboljšali kazalnik časa obdelave EMTI. Vsaka manjša regija je bila ocenjena za združitev s sosednjimi regijami, pri čemer je bila odločitev za združitev sprejeta na podlagi doseganja bolj ugodnega EMTI (16). Po regionalizaciji je bila za raziskovanje potencialnih smeri obdelave uporabljena funkcija globalne optimizacije z roji delcev PSO (Particle Swarm Optimization) v Matlabu, ki maksimizira ciljno funkcijo $F(\varphi) = V_{\max}^{opt}$ (4). Optimalne smeri obdelave omogočajo oblikovanje vektorskega polja hitrosti VVF, ki se nato uporablja za načrtovanje poti v programu CAM. Končni rezultat regijske segmentacije je viden na *sliki 3a*, *slika 3b* pa prikazuje načrtovane obdelovalne poti pri izračunu števila prehodov po enačbi (9).



Slika 3 : Regijska segmentacija obdelovanca: **(a)** optimalne smeri in največje izvedljive hitrosti (mm/s) za vsako regijo (VVF-polje), **(b)** obdelovalne poti za izračun števila prehodov

3.2 Validacija hitrosti

Tehnološki parametri, uporabljeni pri eksperimentih, vključujejo vstopno in izstopno hitrost obdelave, ki je bila nastavljena na 150 (mm/s). Enaka vrednost je uporabljena tudi za prehode med različnimi regijami obdelovanca, kjer orodje ni v stiku s površino. Med linearnimi prehodi znotraj posamezne regije, torej pri vodoravnem premiku med zaporednimi obdelovalnimi potmi se uporablja nižja hitrost, nastavljena

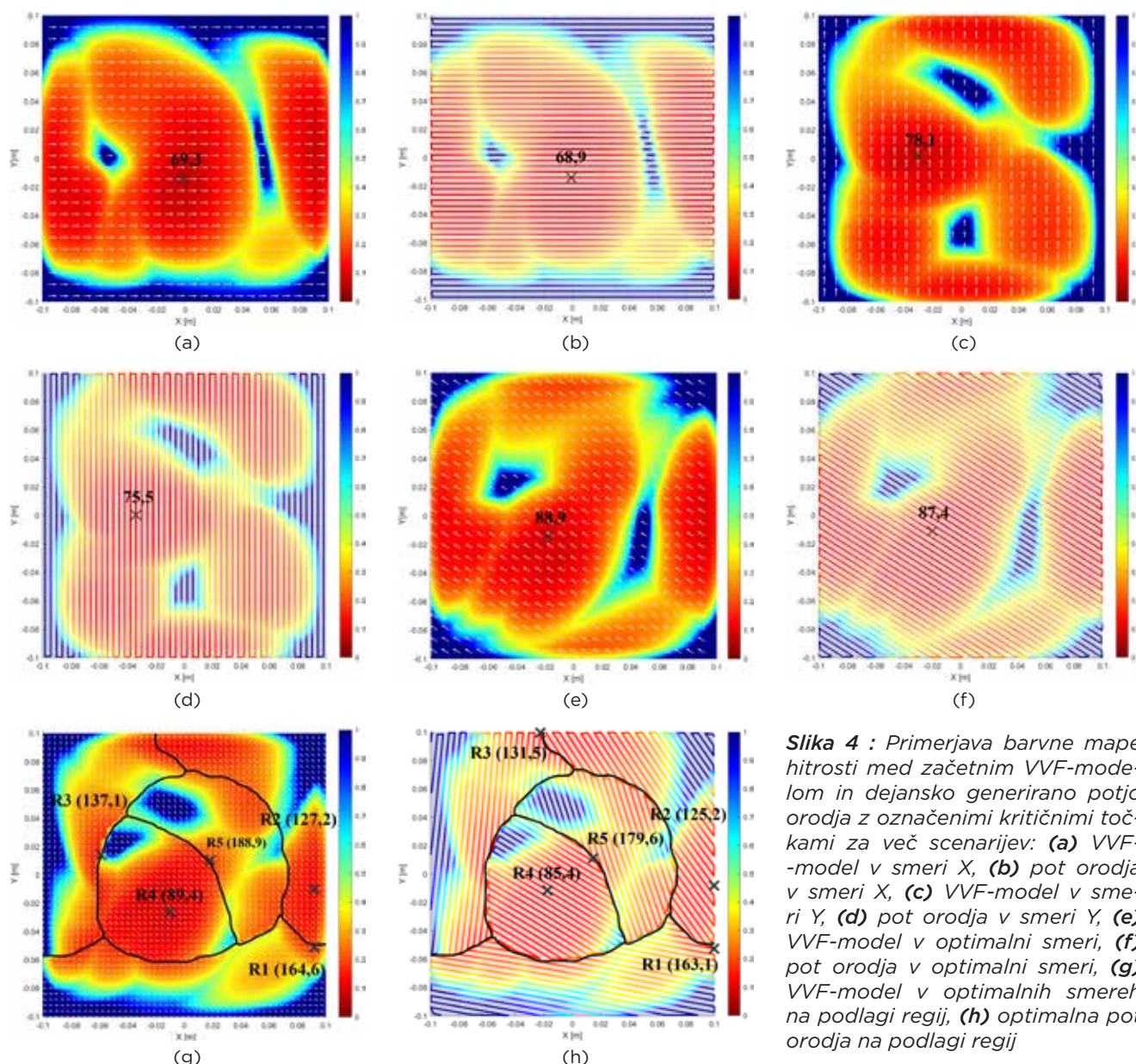
na 20 (mm/s), pospešek robota je bil nastavljen na 1,5 (m/s²). V skladu s priporočili za postopek mikrokovanja pa se razdalja med prehodi običajno giblje med 0,1 (mm) in 2 (mm), kar omogoča ustrezno prekrivanje in konsistentno površinsko obdelavo.

Obravnavana sta dva različna načina poti obdelave, in sicer prvi pristop temelji na tradicionalni enosmerni obdelavi, pri kateri so bile orodne poti generirane vzdolž vnaprej določenih koordinatnih osi – najprej v smeri osi X (*slika 4b*) in nato v smeri osi Y (*slika 4d*). Ta metoda predstavlja klasičen pristop CAM, kjer je smer gibanja konstantna čez celotno površino, ne glede na geometrijo obdelovanca ali manipulabilnostno karakteristiko robotskega sistema. Posledično lahko pride do lokalnega zmanjšanja hitrosti in manj učinkovite izrabe kinematičnega potenciala robota. Drugi pristop uvaja obdelavo z optimiziranimi smermi, kjer je bila najprej določena globalna optimalna smer za celoten obdelovanec. Ta je bila izračunana na podlagi vrednosti indeksa EMTI s ciljem maksimirati minimalno dopustno hitrost gibanja v vseh točkah površine (*slika 4f*). V nadaljevanju je bila površina razdeljena na več regij z uporabo metode segmentacije, pri čemer je bila za vsako regijo posebej določena lastna optimalna smer obdelave, prav tako na osnovi lokalnega EMTI. Obdelovalne poti so bile nato generirane znotraj posamezne regije v smeri, ki maksimizira kinematično učinkovitost obdelave (*slika 4h*). Takšen regijsko prilagojen pristop omogoča večjo fleksibilnost pri načrtovanju poti in boljši izkoristek robotskih zmogljivosti, še posebej pri kompleksnih geometrijah, kjer enotna smer gibanja ne more optimalno pokriti vseh področij površine.

Naša metodologija za izračun največje izvedljive hitrosti obdelave površine robota $V_{\max}^{opt}$ (4) v optimalni smeri je bila razvita v tangentni ravnini površine za vse točke, kjer se je ustvarilo polje VVF, kot je prikazano na *slikah 4a, c, e, g* in so bile generirane poti obdelave (*slika 4b, d, f, h*). Največje izvedljive hitrosti za te poti obdelave so bile določene z metodo DTF [10], ki izračuna največjo dopustno linearno hitrost robota med zaporednimi točkami vzdolž poti obdelave:

$$V_{\max}^{path} = \frac{1}{\left\| \tilde{J}_T^{\dagger} \hat{u}_T^{path} + h^{-1} \tilde{J}_R^{\dagger} \hat{u}_R^{path} \right\|_{\infty}} \quad (17)$$

kjer sta $\hat{u}_T^{path}$ in $\hat{u}_R^{path}$ linearna in kotna smer vzdolž poti. Parameter h predstavlja razmerje med translacijskim in rotacijskim gibanjem orodja vzdolž površine, ki je v našem primeru določeno z geometrijo obdelovanca in ga lahko izračunamo kot $h = 1 / \sqrt{\kappa_n^2 + \tau_g^2}$ [11], kjer je κ_n normalna ukrivljenost, τ_g pa geodetska torzija. V tem validacijskem procesu smo želeli preveriti, ali se dejanske poti obdelave in njihove največje izvedljive hitrosti ujemajo z začetnimi načrtovanimi vrednostmi. Na *sliki 4* je prikazana primerjava v smeri osi X (*sliki 4a, b*) v smeri osi Y (*slika 4c, d*), v optimalni smeri (*slika 4e, f*) in v smereh na podlagi regij (*slika 4g, h*).



Slika 4 : Primerjava barvne mape hitrosti med začetnim VVF-modelom in dejansko generirano potjo orodja z označenimi kritičnimi točkami za več scenarijev: (a) VVF-model v smeri X, (b) pot orodja v smeri X, (c) VVF-model v smeri Y, (d) pot orodja v smeri Y, (e) VVF-model v optimalni smeri, (f) pot orodja v optimalni smeri, (g) VVF-model v optimalnih smereh na podlagi regij, (h) optimalna pot orodja na podlagi regij

Preslikava iz modela VVF na dejanske poti obdelave lahko povzroči odstopanja pri največjih izvedljivih hitrostih. Ta odstopanja nastanejo zaradi razlike v gostoti modelnih točk in točk generiranih poti ter njihovih različnih položajev, vendar pa bi se ta odstopanja z večjo gostoto točk morala približati ničli. Na sliki 4 temno sivi križci označujejo največje izvedljive hitrosti v (mm/s). Hkrati barvna mapa prikazuje celoten razpon hitrosti na površini, pri čemer rdeča barva pomeni nižjo hitrost, modra pa višjo. Kljub manjšim odstopanjem so rezultati validacije na splošno pokazali dobro ujemanje, kar potrjuje sposobnost metode za natančno napovedovanje optimalnih smeri in hitrosti pred fazo generiranja poti. Dejanski testi so bili izvedeni na modelnih površinah obdelovancev s 2500 modelnimi točkami, pri čemer so bile poti površinske obdelave generirane z razdaljo med prehodi 2 (mm), kar je zneslo približno 22.000 točk za obravnavani primer. Razvidno je, da je bilo največje odstopanje približno

5 % ali manj. To potrjuje robustnost naše metode, saj so ta odstopanja ostala minimalna in znotraj sprejemljivih meja, kar dokazuje, da je metoda delovala dobro, tudi v scenarijih, ki vključujejo regijsko površinsko obdelavo. V praksi se za obdelavo na realnem robotu zaradi odstopanj v modelih priporoča uporaba 10 % nižjih hitrosti, da lahko zagotovimo uspešno izvedljivost obdelave.

3.3 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni testi so bili izvedeni na prilagodljivi robotski platformi, opremljeni s sodelujočim robotom UR5e, kot je prikazano na sliki 1. Generiranje obdelovalnih poti je potekalo v programskem okolju Autodesk Fusion 360 CAM (2602.0.71), medtem ko sta bili simulacija gibanja in časovna analiza izvedeni s pomočjo okolja RoboDK (v5.7.4). S tem je bila omogočena primerjava ocenjenih časov obdelave za regijsko in tradicionalno strategijo na ravni

Tabela 1 : Primerjava časa obdelave med različnimi strategijami. Izboljšava v (%) je med optimalno smerjo in regijami.

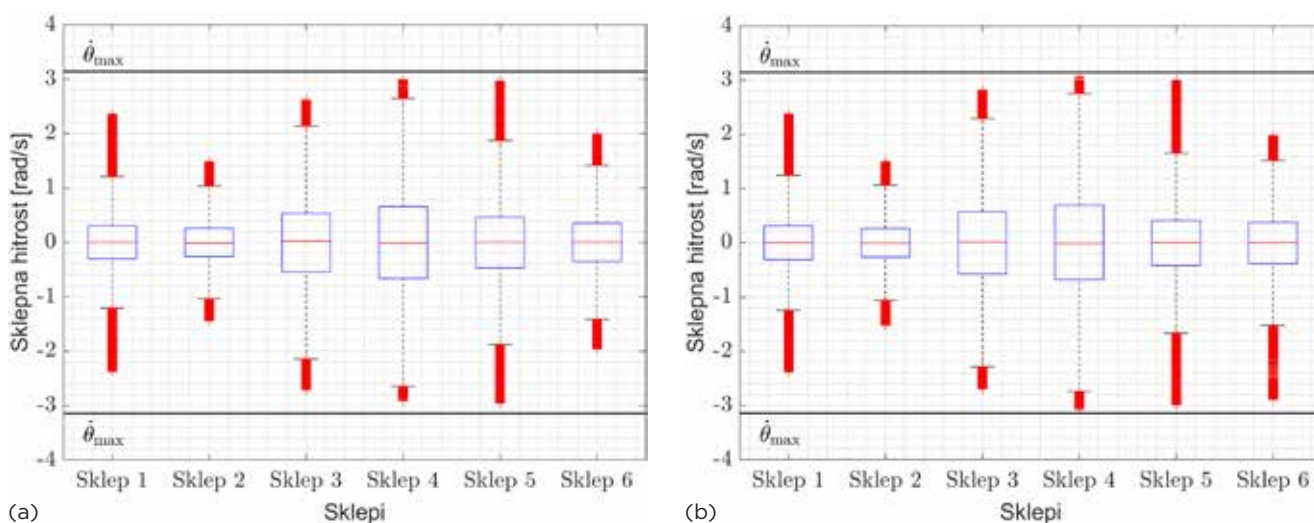
	X-smer	Y-smer	Opt. smer	Opt. regije	Izb. %
EMTI [sek]	148,1	130,9	118,2	103,6	
Max. izvedljiva hitrost [mm/s]	62,4	70,3	80	R5: 170	
Prehod 2 mm					
Čas obdelave [min:sek]	6:03	5:21	4:50	4:07	14,8
Prehod 1 mm					
Čas obdelave [min:sek]	11:56	10:33	9:32	7:45	18,7
Prehod 0,5 mm					
Čas obdelave [min:sek]	23:40	20:55	18:54	14:55	21,1
Prehod 0,1 mm					
Čas obdelave ur:min:sek]	1:58:25	1:44:46	1:34:31	1:13:11	22,6

simulacije, medtem ko so bili dejanski časi obdelave pridobljeni preko protokola RTDE (ang. Real-Time Data Exchange) z izvedbo procesov na fizičnem robotskem sistemu UR5e.

Analiza prikazuje učinkovitost posameznih metod obdelave, pri čemer posebej izpostavlja prednosti pristopa na podlagi regij v primerjavi s klasičnimi enosmernimi strategijami obdelave. Rezultati so prikazani v tabeli 1, kjer je mogoče opaziti zmanjšanje časa obdelave na realnem sistemu za približno 14–24 %, odvisno od gostote poti. Ključno je to, da izboljšan indeks EMTI bistveno bolje ocenjuje realni čas obdelave, ki upošteva razmerje med hitrostjo in časovnimi izgubami. Tako dobimo bolj uravnotežene regije v primerjavi s prejšnjim pristopom, kjer je bilo število segmentov zmeraj proti vrednosti C_{max} [9].

Rezultati eksperimentalne primerjave jasno kažejo, da strategija obdelave na osnovi regijske delitve pomembno presega tradicionalne pristope pri zmanjševanju skupnega časa obdelave. Z razdeli-

tvijo obdelovanja na regije je mogoče preprečiti ozko grlo pri obdelavi celotnega obdelovanca z minimalno (maksimalno izvedljivo) hitrostjo, ki jo нареkuje enosmerni linearni pristop. Namesto tega se lahko vsaka regija obdelava z optimizirano hitrostjo, ki je najbolj primerna za njene specifične značilnosti. Pri mikrokovanju se lahko prilagodi frekvenca oscilacije orodja, tj. število udarcev karbidne kroglice na sekundo, kar omogoča sinhronizacijo s hitrostjo obdelave orodja. Ta sinhronizacija zagotavlja, da je vsaka regija ustrezno obdelana, kar izboljša splošno kakovost in učinkovitost procesa obdelave. Na sliki 5 sta prikazana škatlasta diagrama sklepni hitrosti za optimalno smer obdelave in obdelavo z regijami, kjer je vidno, da v nobenem primeru niso bile presežene maksimalne dopustne sklepne hitrosti (3,14 rad/s). To pomeni, da so bile vse načrtovane poti skladne z omejitvami sistema in izvedljive v praksi. Takšna skladnost potrjuje robustnost naše metode pri generiranju varnih in časovno optimiziranih poti gibanja, obenem pa potrjuje uspešnost regijskega pristopa kot realno izvedljive strategije za zahtevne

**Slika 5 :** Škatlasta diagrama sklepni hitrosti za različne strategije obdelave: **(a)** enosmerna optimalna smer obdelave, **(b)** obdelava na podlagi regij

aplikacije površinske obdelave.

3 Zaključek

Predstavljena raziskava je usmerjena v analizo kinematičnih zmogljivosti industrijskega robota pri površinski obdelavi obdelovancev s srednjekompleksno geometrijo. Na podlagi obstoječih teoretičnih temeljev smo razvili pristop, ki temelji na vektorskem polju hitrosti (VVF) kot osnovi za generiranje obdelovalnih poti, usklajenih z lokalnimi kinematičnimi značilnostmi robota in geometrije površine. Z uporabo tega koncepta smo implementirali metodo regijske obdelave, ki omogoča individualno optimizacijo hitrosti in smeri v vsaki regiji s ciljem povečanja učinkovitosti celotne obdelave.

V primerjavi s prejšnjo raziskavo [9] smo v tej študiji razvili izboljšan indeks za oceno časa obdelave (EMTI), ki upošteva tudi časovne izgube prehodov med posameznimi potmi, ter uvedli postopek iskanja optimalnega števila segmentov na podlagi tega indeksa. S tem smo zagotovili bolj realistično oceno časovne učinkovitosti, ki je bila tudi eksperimentalno preverjena na fizičnem robotskem sistemu. Na podlagi razvite metode smo ugotovili, da regijsko prilagojene strategije omogočajo izboljšave časa v primerjavi s tradicionalno enosmerno obdelavo. Odvisno od razdalje med prehodi se je čas obdelave zmanjšal za od 14 % do 22 %. Največje izboljšave so bile dosežene pri manjših razmikih med potmi, kar kaže na visoko učinkovitost regijskega pristopa pri gostejših poteh gibanja, kjer so klasične metode pogosto neučinkovite zaradi dinamičnih izgub.

Viri

- [1] Bleicher, F.; Lechner, C.; Habersohn, C.; Kozeschnik, E.; Adjassoho, B.; Kaminski, H. Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology. *CIRP Ann.* 2012, 61, 375–378. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.139>.
- [2] Liao, Z.-Y.; Li, J.-R.; Xie, H.-L.; Wang, Q.-H.; Zhou, X.-F. Region-based toolpath generation for robotic milling of freeform surfaces with stiffness optimization. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2020, 64, 101953. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101953>.
- [3] Xie, H.-L.; Li, J.-R.; Liao, Z.-Y.; Wang, Q.-H.; Zhou, X.-F. A robotic belt grinding approach based on easy-to-grind region partitioning. *J. Manuf. Process.* 2020, 56, 830–844. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.051>.
- [4] Hu, Z.; Hua, L.; Qin, X.; Ni, M.; Liu, Z.; Liang, C. Region-based path planning method with all horizontal welding position for robotic curved layer wire and arc additive manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2022, 74, 102286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102286>.
- [5] Yin, F.-C. A Partitioning Grinding Method for Complex-Shaped Stone Based on Surface Machining Complexity. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022, 47, 8297–8314. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06150-0>.
- [6] Hacı, A. Toward Optimal Robot Machining Considering the Workpiece Surface Geometry in a Task-Oriented Approach. *Mathematics* 2024, 12, 257.
- [7] S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129–137, March 1982, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [8] Han, J.; Kamber, M.; Pei, J. *Data Mining: Concepts and Techniques*; Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Burlington, MA, USA, 2011.
- [9] Pušnik, T.; Hacı, A. Region-Based Approach for Machining Time Improvement in Robot Surface Finishing. *Appl. Sci.* 2024, 14, 9808. <https://doi.org/10.3390/app14219808>.
- [10] Stradovnik, S.; Hacı, A. Task-Oriented Evaluation of the Feasible Kinematic Directional Capabilities for Robot Machining. *Sensors* 2022, 22, 4267. <https://doi.org/10.3390/s22114267>.
- [11] Stradovnik, S.; Hacı, A. Workpiece Placement Optimization for Robot Machining Based on the Evaluation of Feasible Kinematic Directional Capabilities. *Appl. Sci.* 2024, 14, 1531. <https://doi.org/10.3390/app14041531>.

Improved Time-Optimal Planning of Robotic Surface Finishing Using a Region-Based Approach

Abstract:

Traditional approaches to robotic surface machining often rely on a predefined, constant direction and speed of tool motion, regardless of the local characteristics of the workpiece. Such a uniform strategy results in inefficient utilization of the robot's capabilities, particularly when dealing with complex geometries where the kinematic performance can vary significantly across different surface regions. In this study, we present an advanced approach based on surface segmentation of the workpiece into regions, where each region is assigned a locally optimal machining direction and speed, derived from the robot's kinematic capabilities and the geometry of the surface. An improved machining time index was developed, incorporating a penalty for toolpath transitions, along with a new procedure for determining the optimal number of initial segments. This enables a more realistic estimation of the overall process efficiency. Numerical and experimental results confirm that the proposed region-based strategy achieves up to 22% reduction in machining time compared to conventional unidirectional strategies.

Keywords:

robot surface machining, machining time optimization, collaborative robots, surface segmentation, machine hammer peening