

Jernej Hrnavaš

UI-PODPRTO RAVNANJE KALJENIH KOVINSKIH OBDELOVANCEV: OD NAPOVEDI OBLIKE DO PATENTIRANEGA SISTEMA ZA STROJNO RAVNANJE

Znanstveno-tehnološki forum Rudolfovo 2026

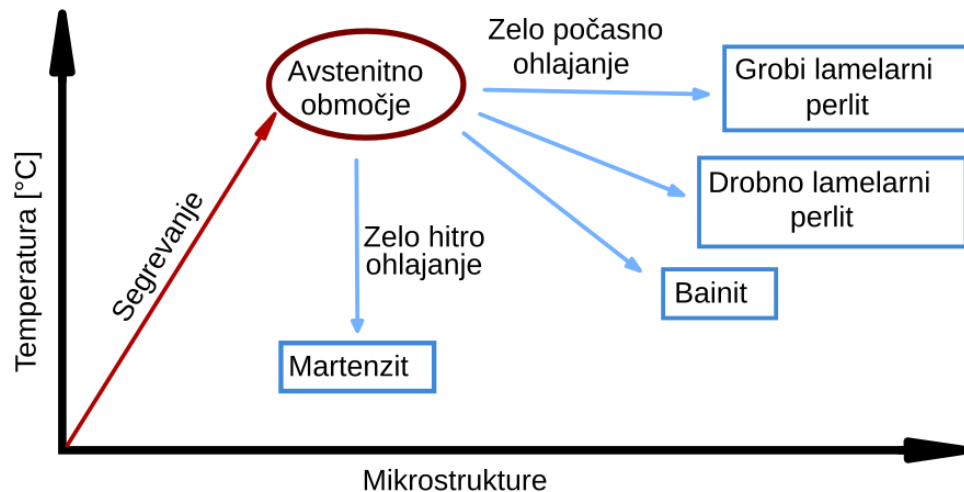


PROBLEMATIKA

PROBLEMATIKA

Kaljenje

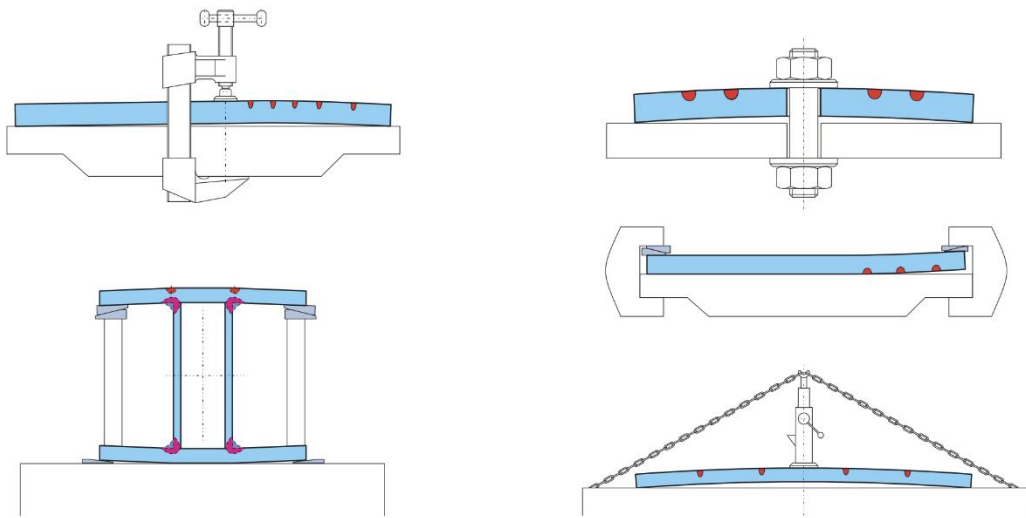
- Industrijski noži, orodjarstvo, avtomobilska industrija
- Kaljenje --> trdota na ~60 HRC
- Neželena posledica: geometrijske deformacije zaradi zaostalih napetosti



PROBLEMATIKA

Konvencionalni postopki ravnanja

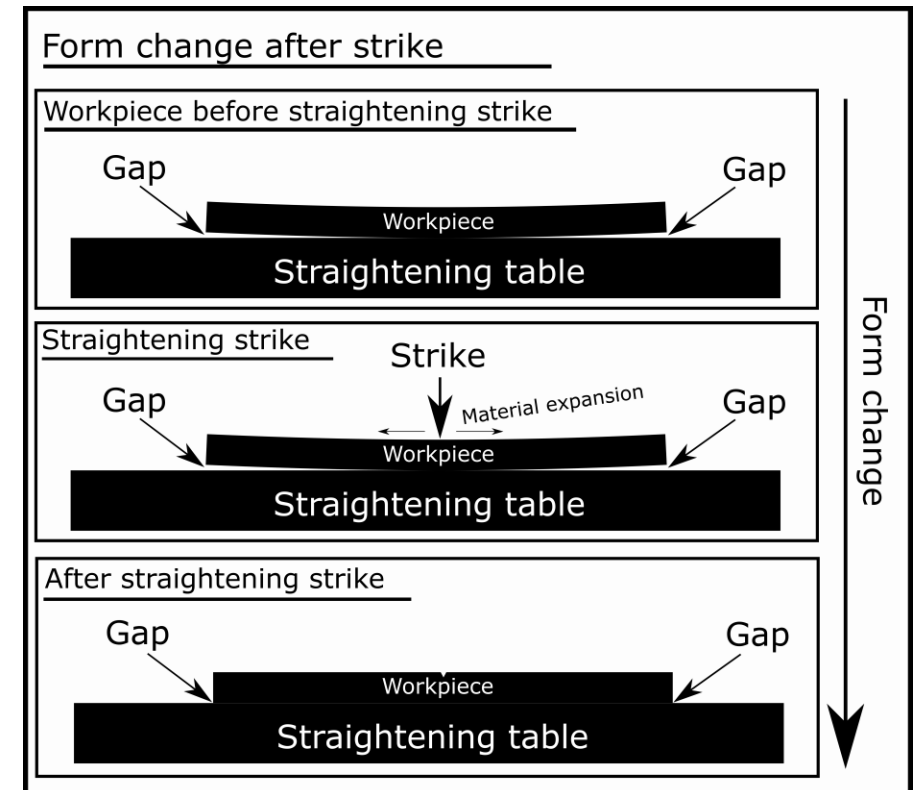
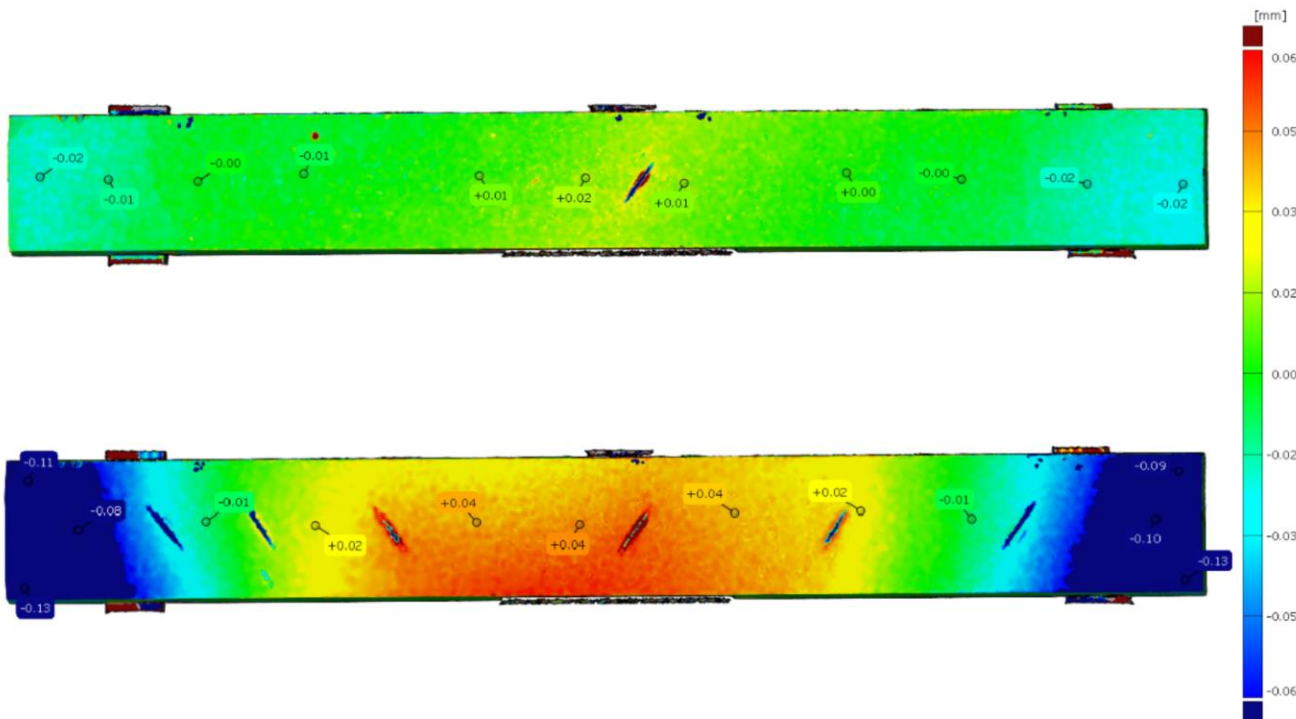
- Upogibanje, valjanje, vpenjanje
- ~60 HRC --> porušitev materiala
- Alternativa: ponovna toplotna obdelava



PROBLEMATIKA

Edina učinkovita metoda – površinske plastične deformacije

- Udarec s kladivom --> lokalna deformacija --> ravnanje
- Učinkovito ravnanje tudi pri visoki trdoti



PROBLEMATIKA

Izzivi ročnega ravnanja

- Subjektivnost in variabilnost (izkušnje delavca)
- Dolgotrajnost in fizična obremenitev
- Ni ponovljivosti --> visoki stroški in nizka produktivnost



PROBLEMATIKA

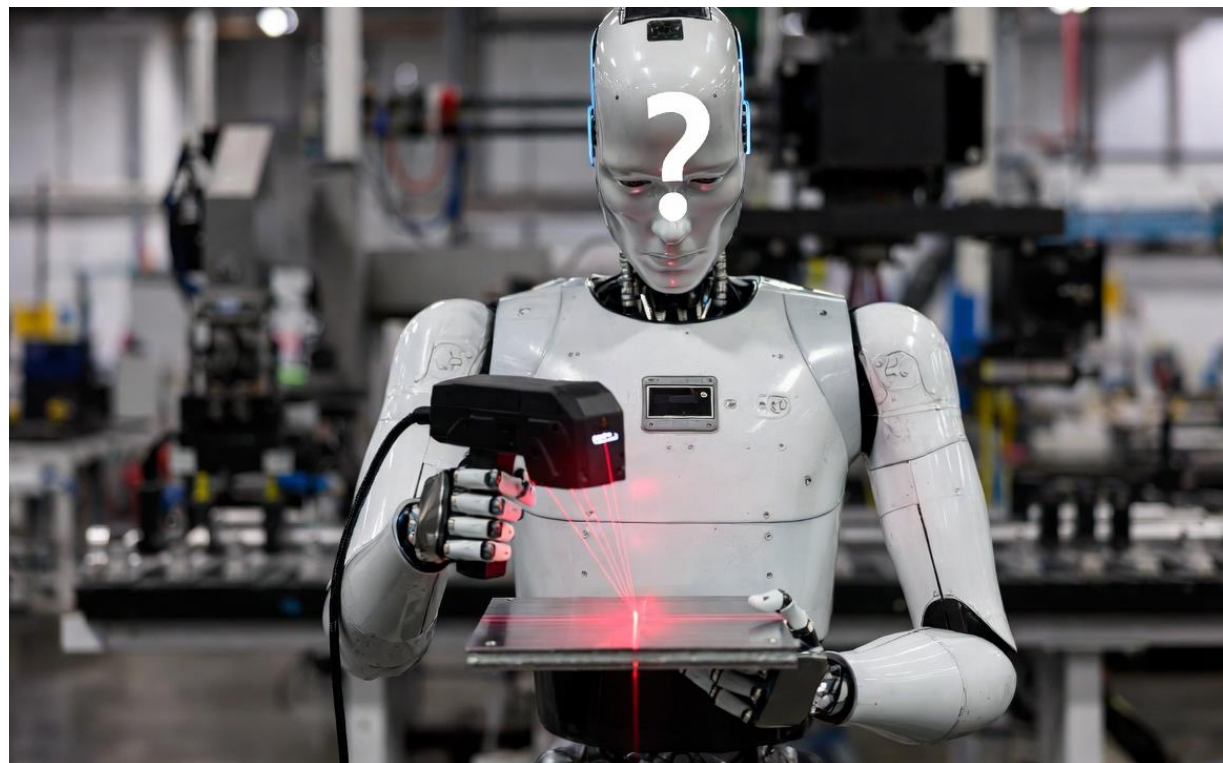
Industrijska potreba

- Industrija 4.0 zahteva avtomatizacijo, digitalizacijo
- Potreba po napovednem modelu: »Kakšna bo oblika po udarcu?«

PROBLEMATIKA

Raziskovalno vprašanje

- **Glavno vprašanje:** Ali je mogoče z UI napovedati obliko kaljenega obdelovanca na podlagi 3D skenov in akustičnih odzivov?

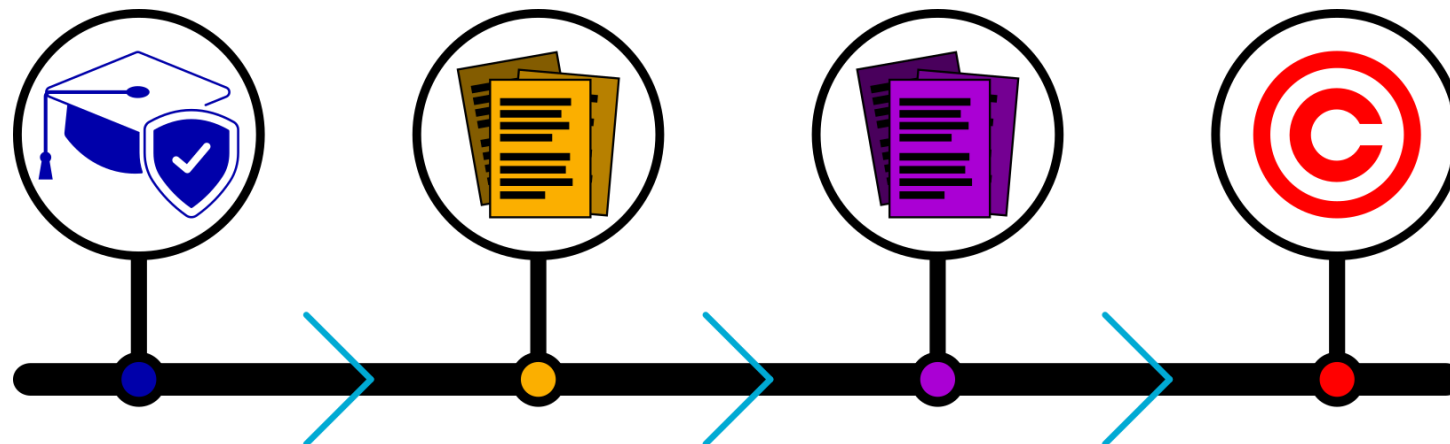


RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Pregled

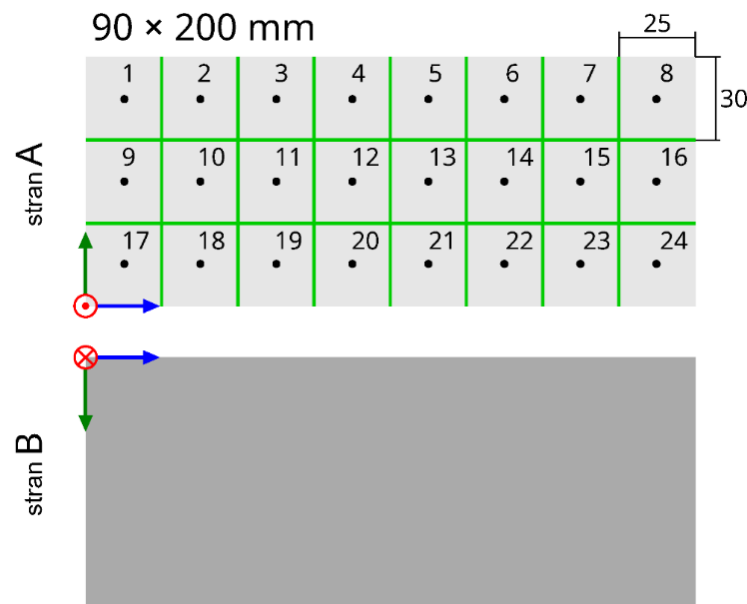
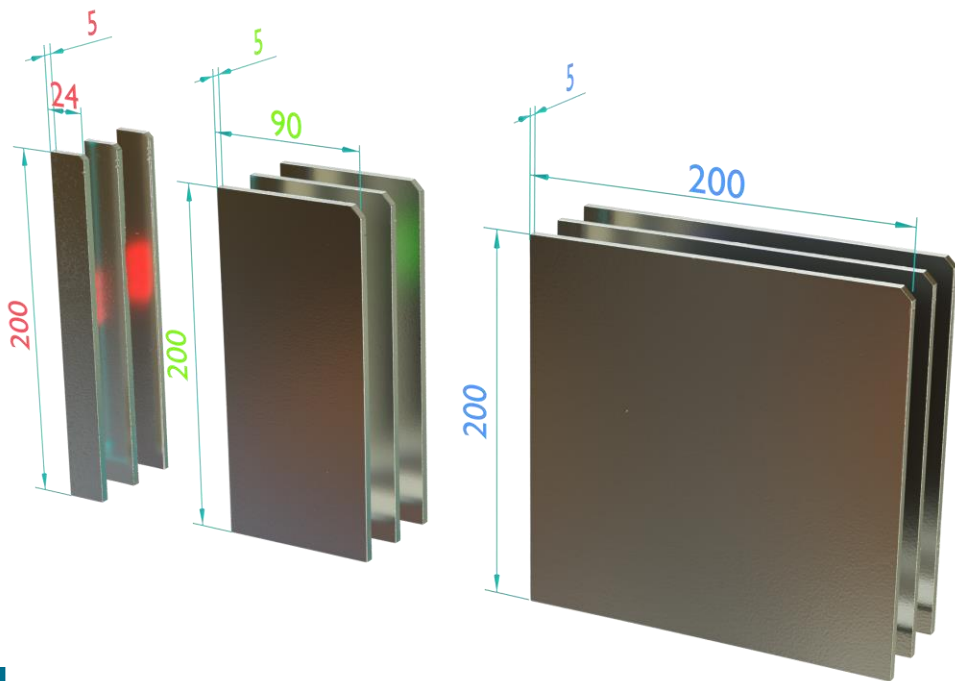
- Tadej Peršak, doktorska disertacija, 2023
- Članek 1, 2023
- Članek 2, 2025
- EU Patent, 2025



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Eksperiment

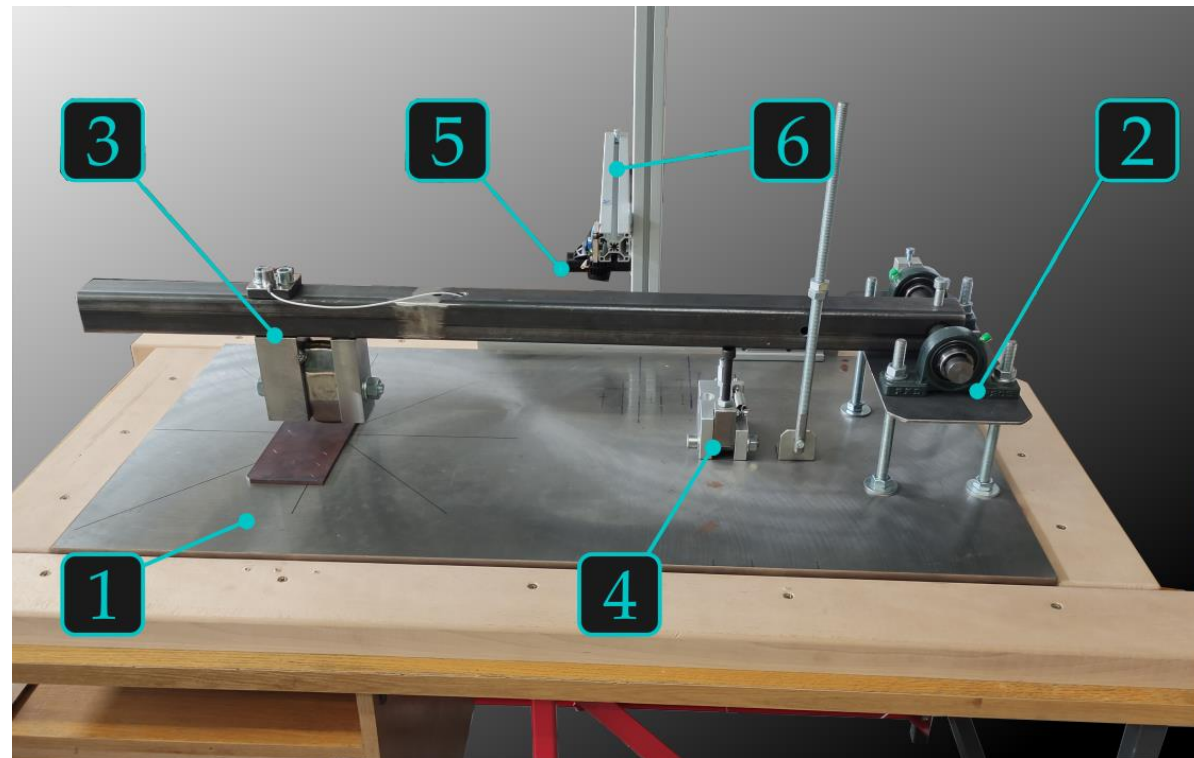
- 9 obdelovancev (3 x 3 variante: 24/90/200 mm)
- 219 oblikovnih stanj
- Nadzorovani udarci + 3D skeniranje (GOM Atos Core 200)



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Naprava in senzorji

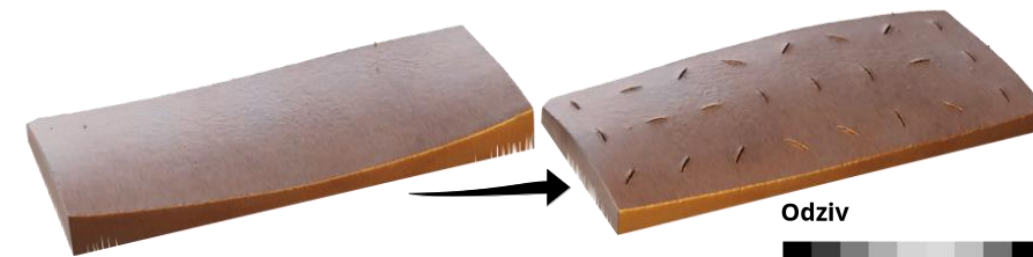
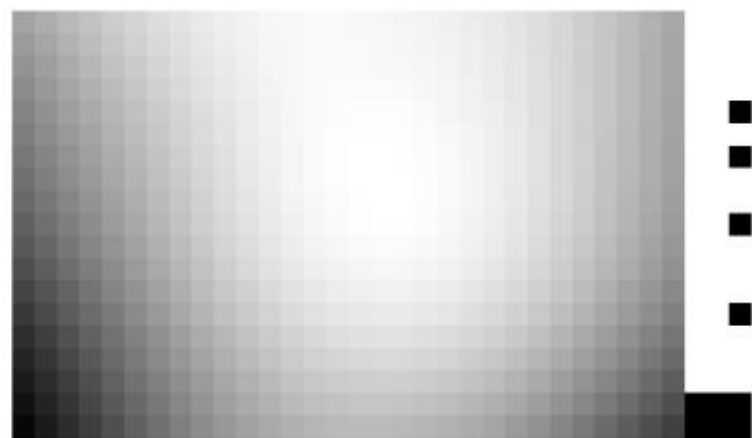
- Kladivo + mikrofoni PCB 130F22
- Signalni udarci (ne-deformirajoči)
- CWT --> skalogramami



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Model 1: U-Net, sprememba oblike po udarcu

- Vhod: trenutna oblika + načrtovani udarci
- Izhod: nova oblika (5x9 matrika)
- Rezultati: **RAE 0,049 / RMSE 0,013 / RSE 0,004**



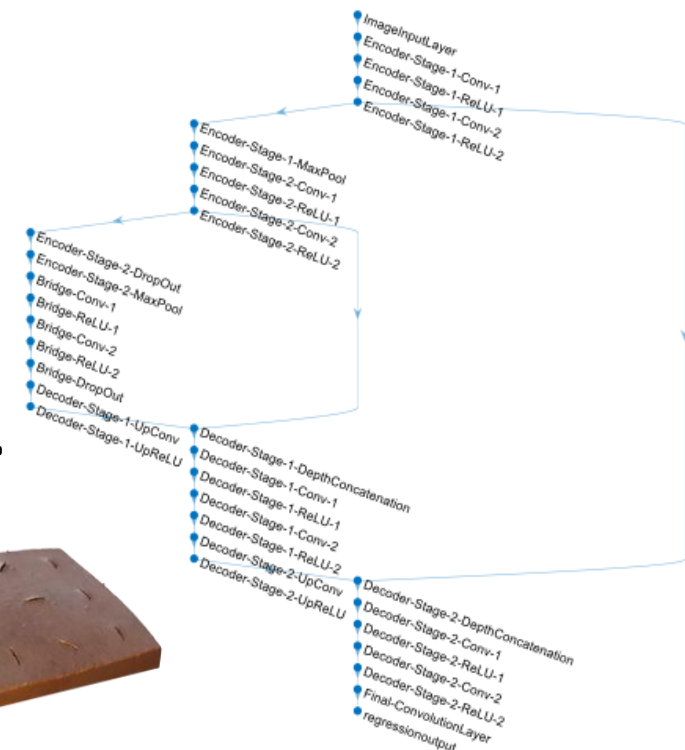
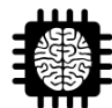
Vhod

Izvedba 24 udarcev

Odziv

Nevronska mreža

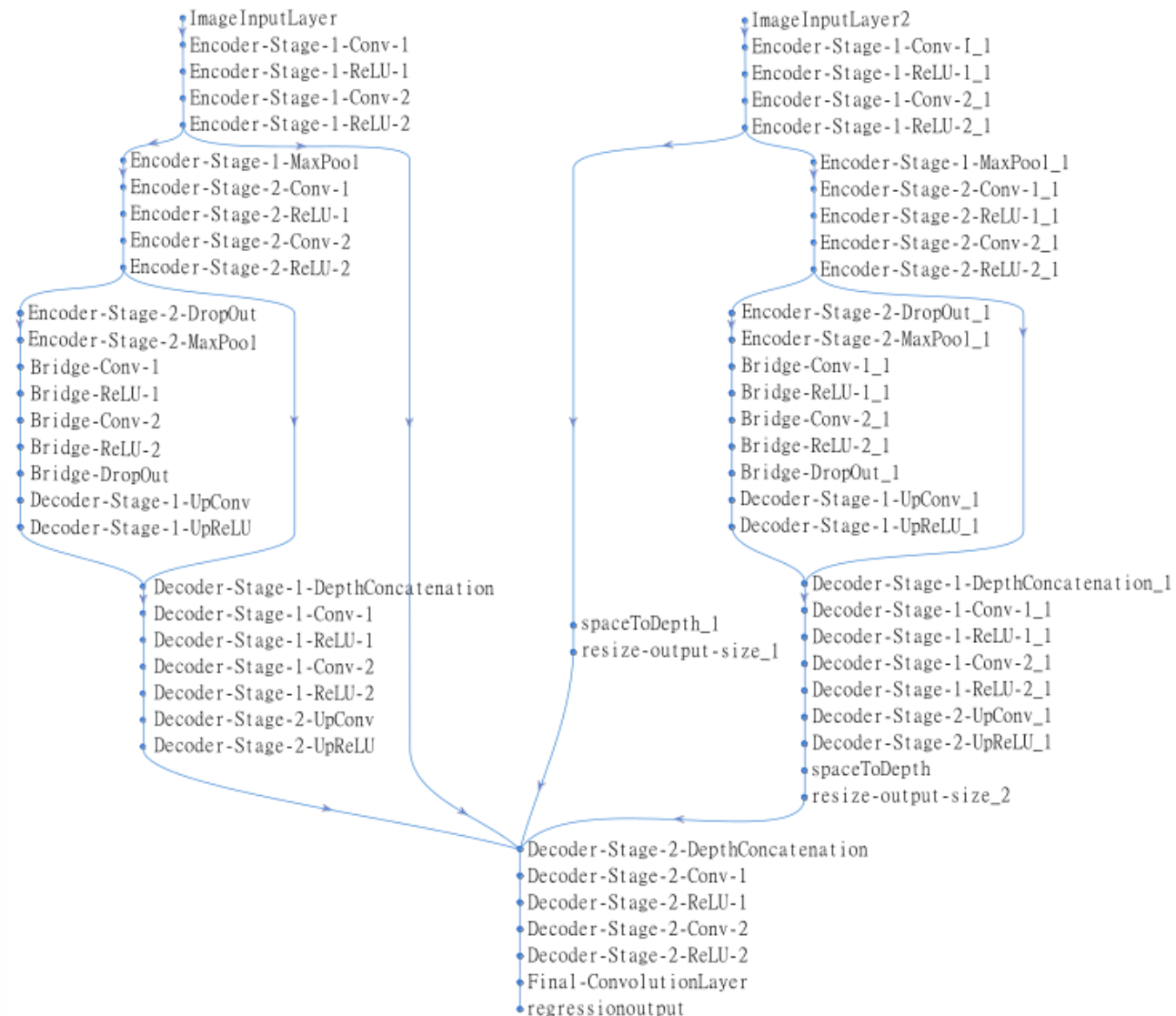
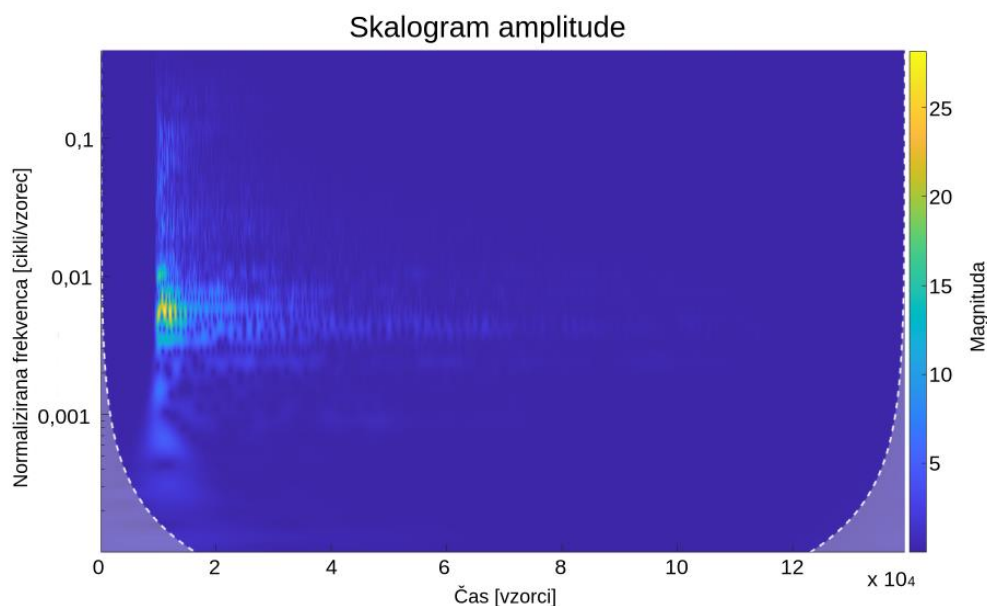
Napoved



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Model 2: zvok ravnalnega udarca

- Dodan skalogram zvoka
- Lastna CNN arhitektura
- Rezultati: RAE 0,074



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

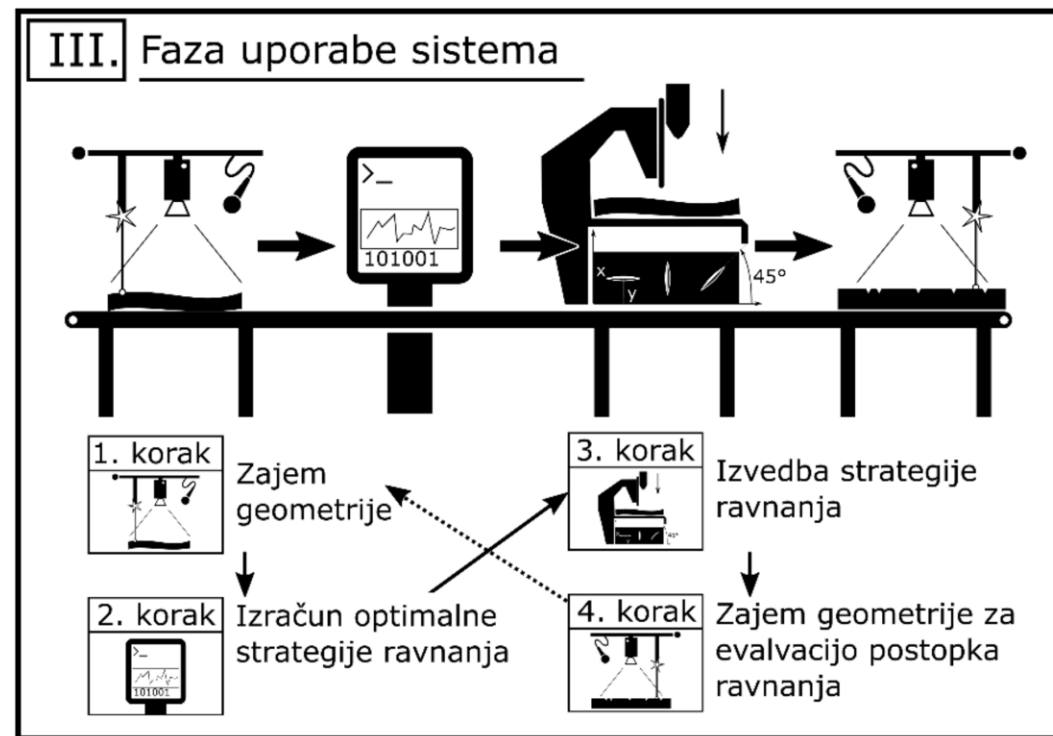
Model 3: napoved oblike SAMO iz akustike (JAMT 2025)

- 40-slojna CNN
- CWT skalogramami (612 x 13608)
- Deep CNN najboljši (RAE 0,744 / RMSE 0,174)
- Konkurenčno z XGBoost in Random Forest

RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Patentirana rešitev

- EP 4 442 408 B1
- A System and a Method for Machine-Assisted Straightening of Hardened Metal Workpieces



RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Prispevki k znanosti

- Največja javna baza 3D in akustičnih podatkov za kaljene obdelovance
- Nova CNN arhitektura za multi-modalni vnos
- Dokaz: zvok vsebuje informacijo o obliki
- Napoved nove oblike po načrtovanem udarcu

RAZISKOVALNO DELO DO SEDAJ

Omejitve dosedanjega dela

- Konstantna sila kladiwa
- Material 1.2379
- Relativno majhen set podatkov (219 stanj)
- Poenostavljena reprezentacija oblike (5 x 9 matrika)



PRIHODNJE DELO

PRIHODNJE DELO

Izhodišče moje raziskave

- Temelji na Tadejevem delu in člankih
- Namen: avtomatizacija ravnalnega procesa



PRIHODNJE DELO

Cilji

- C1: Sposobnejši model OBLIKA + UDAREC --> NOVA OBLIKA
- C2: Model za Optimalno Ravnalno Strategijo (MORS)
- C3: Prototip ravnalnega sistema

PRIHODNJE DELO

Pričakovani rezultati

- Večji dataset (1000+ stanj)
- Natančnost > 98 % pri napovedi oblike
- Zmanjšanje števila udarcev za 40-60 %
- Izboljšanje ravnosti za 200+ % v primerjavi z ročnim ravnanjem

PRIHODNJE DELO

Vabilo k sodelovanju

Uporabnost rešitve v industriji, ko rešimo:

- Natančno in hitro 3D skeniranje obdelovancev (0,5-6 metrov)
- Material konice kladiwa
- Avtomatizacija strojnega ravnanja (aktuatorji, roboti?)
- ...



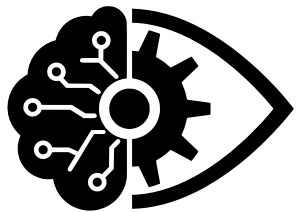
ZAKLJUČEK

ZAKLJUČEK

Ročno ravnanje → pametni ravnalni sistem

- Uspešna napoved nove oblike po načrtovanem udarcu
- Akustični odzivi nosijo informacijo o obliki obdelovanca
- Pridobljen patent: T. Peršak, J. Hernavs, in S. Klančnik, †A †system and a method for machine-assisted straightening of hardened metal workpieces. European Patent Office, 2025, str. [15]

Hvala za pozornost. Vprašanja?



CORTE-X Lab

Kontakt: jernej.hernavs@um.si