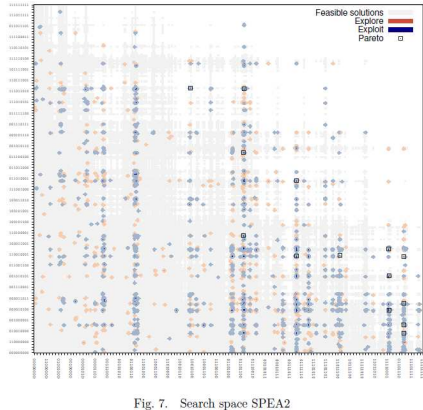


# Razvoj evolucijskih algoritmov in primer praktične izvedbe v povezavi s tovarnami prihodnosti



prof. dr. Marjan Mernik  
Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

# Vsebina

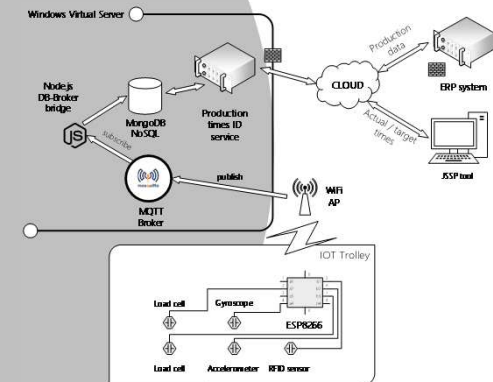
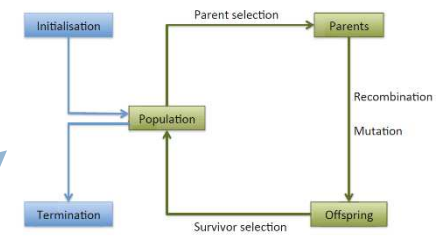


Kratek uvod v  
EA

Eksploracija in  
eksploatacija

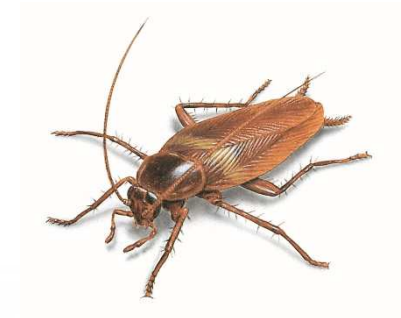
Odprti problemi

Primer s tovarnami  
prihodnosti



# Kratek uvod v EA

- Predlaganih je bilo mnogo algoritmov po vzorih iz narave:
  - posnemanje evolucije (npr., GA, GP, ES, EP)
  - Inteligenca rojev (npr., PSO, ACO)
  - Posnemanje fizikalnih procesov (npr., SA, GSA)

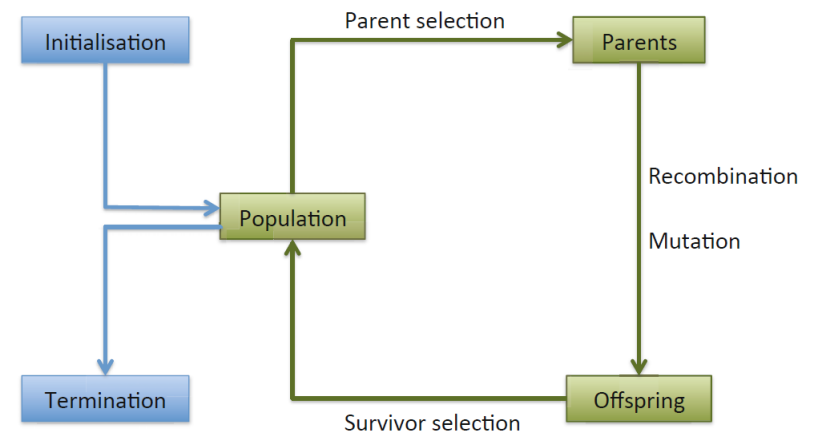


- Kako primerjati vse te algoritme?

# Kratek uvod v EA

## Osnovni evolucijski algoritem (EA)

```
BEGIN
  INITIALISE population with random candidate solutions;
  EVALUATE each candidate;
  REPEAT UNTIL ( TERMINATION CONDITION is satisfied ) DO
    1 SELECT parents;
    2 RECOMBINE pairs of parents;
    3 MUTATE the resulting offspring;
    4 EVALUATE new candidates;
    5 SELECT individuals for the next generation;
  OD
END
```



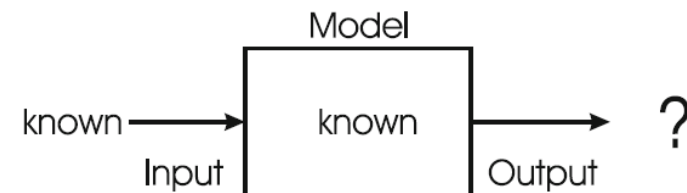
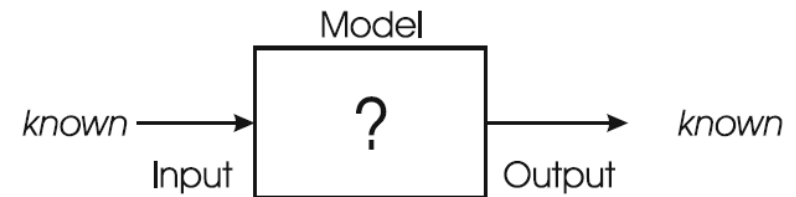
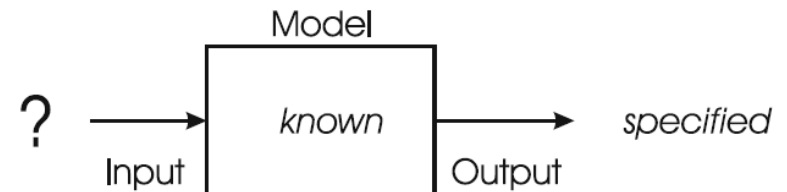
# Kratek uvod v EA

□ Zakaj evolucijsko računanje?

□ Optimizacija

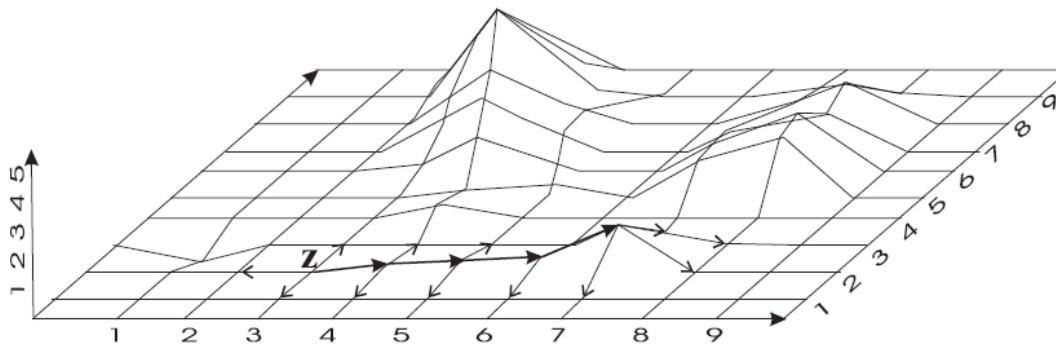
□ Modeliranje

□ Simulacija

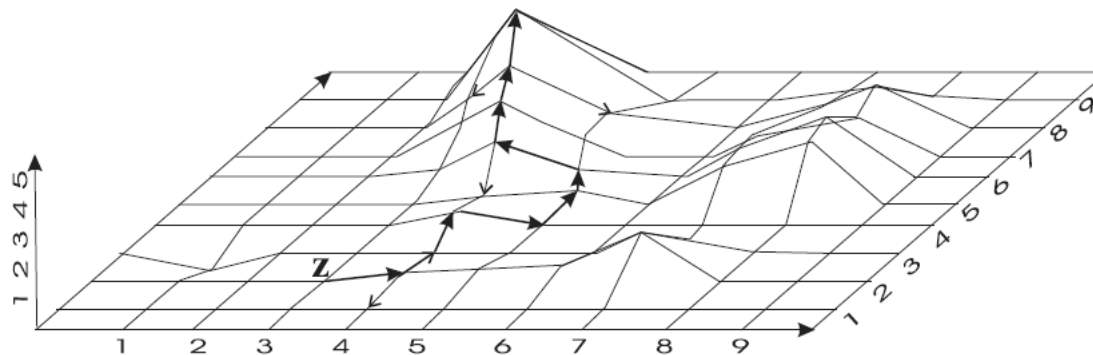


# Kratek uvod v EA

## Hill Climbing (HC)

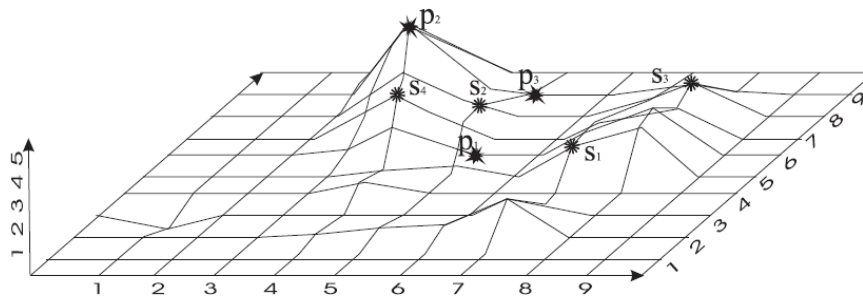
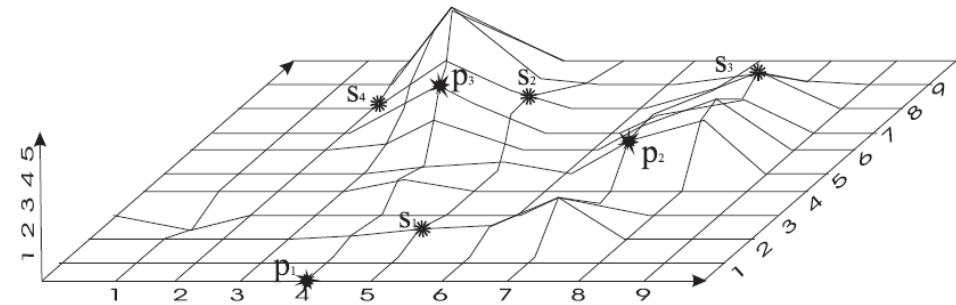
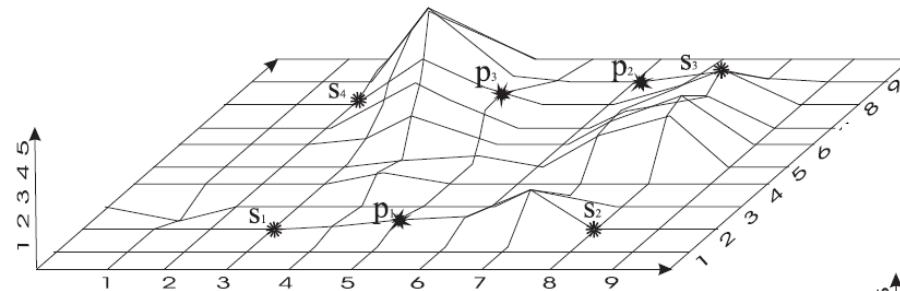


## Simulated Annealing (SA)



# Kratek uvod v EA

## Evolutionary Algorithm (EA)



[https://um-lpm.github.io/EA\\_SOP\\_Visualization/](https://um-lpm.github.io/EA_SOP_Visualization/)

# Eksploracija in eksploatacija



*»Exploration is a process of visiting entirely new regions of a search space«.*

*»Exploitation is a process of visiting regions of a search space based on previously visited points (neighborhood)«.*

M. Črepinšek, S.-H. Liu, M. Mernik. Exploration and Exploitation in Evolutionary Algorithms: A Survey. ACM Computing Surveys, Vol. 45, No. 3, Article 35, 2013.

# Eksploracija in eksploatacija

- Da je iskalni algoritem uspešen mora najti dobro razmerje med eksploracijo in eksploatacijo.

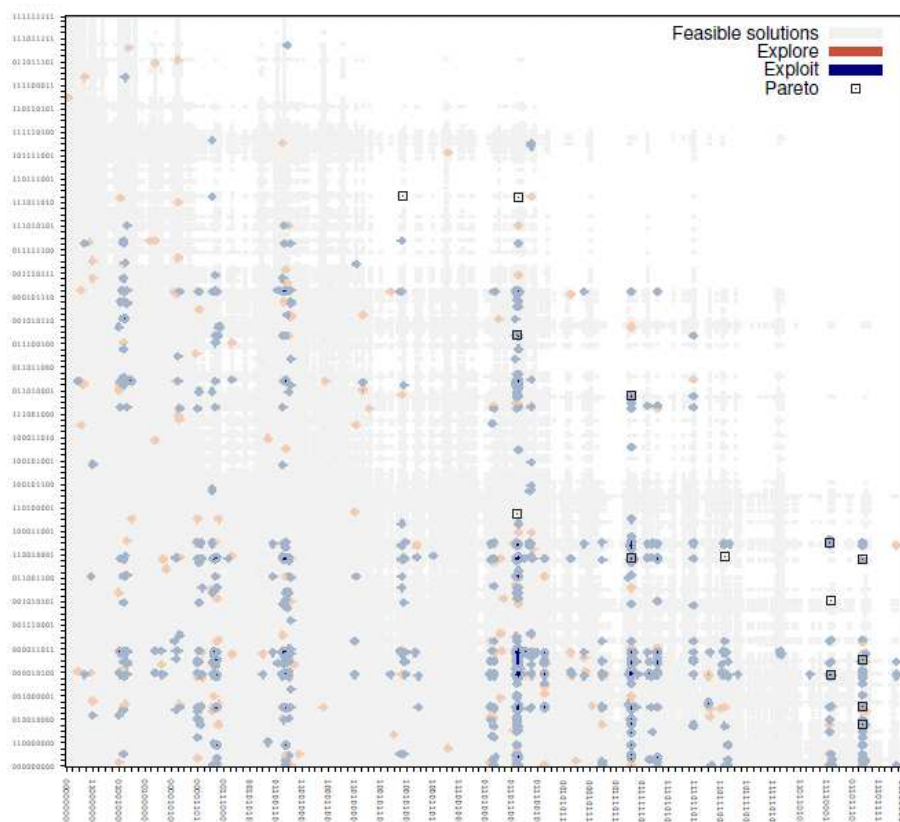


Fig. 6. Search space VEGA

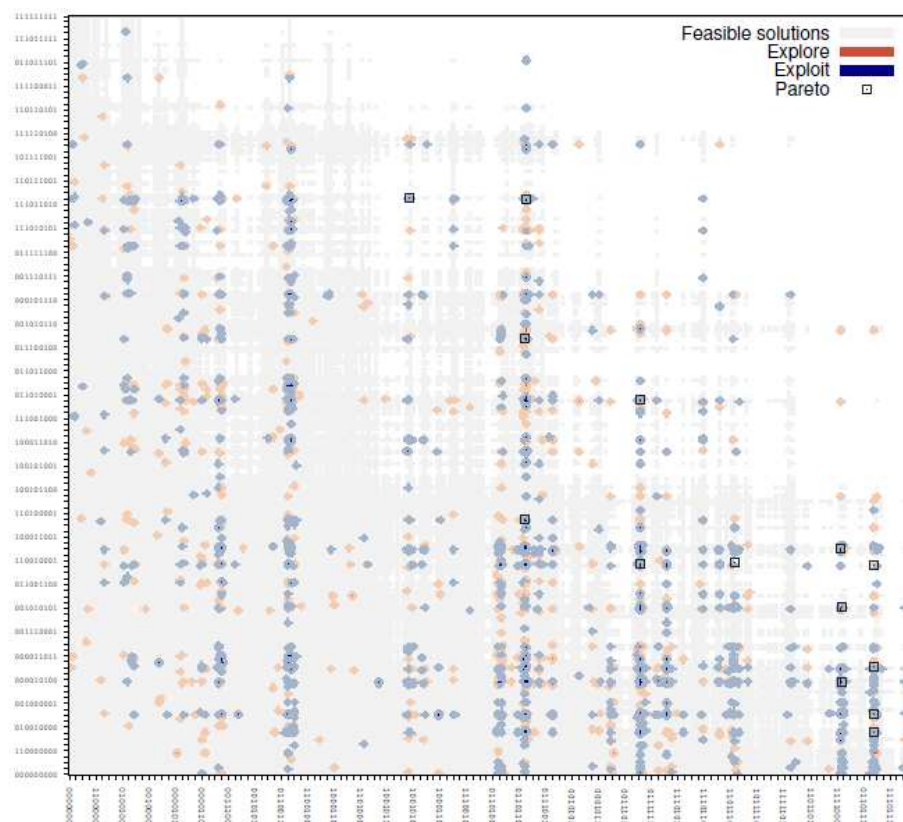


Fig. 7. Search space SPEA2

# Eksploracija in eksploatacija

- Mnogo raziskovalcev verjame da so EA uspešni, ker imajo dobro razmerje med eksploracijo in eksploatacijo.
- »Genetic Algorithms are a class of general purpose (domain independent) search methods which strike a remarkable balance between exploration and exploitation of the search space.« [Michalewicz 1996]
- »The genetic algorithm behaviour is determined by the exploitation and exploration relationship kept throughout the run.« [Herrera and Lozano, 1996]

# Eksploracija in eksploatacija

- Pogosto, vendar napačno, mnenje je da EA realizirajo eksploracijo z križanjem in mutacijo, in eksploatacijo s selekcijo.
- Dejansko križanje, mutacija in selekcija prispevajo tako k eksploraciji kot eksploataciji. Vendar je njihov prispevek zelo težko razmejiti.
- Če je verjetnost križanja in mutacije velika se EA približuje obnašanju naključnega iskanja (Random Search).
- Če je verjetnost križanja in mutacije majhna se EA približuje obnašanju algoritma vzpenjanju na hrib (Hill Climbing).

# Eksploracija in eksploatacija

- Dandanes še zmeraj pogosto uravnavamo dobro razmerje med eksploracijo in eksploatacijo z nastavljanjem krmilnih parametrov.
- Uглаševanje parametrov (parameter tuning) vs. krmiljenje parametrov (parameter control): deterministično (deterministic), adaptivno (adaptive), samo-adptivno (self-adaptive).
- »To explore or to exploit? This is the question now«.  
(*anonymous EA agent*)



# Eksploracija in eksploatacija

- Z razumevanjem procesa eksploracije in eksploatacije bomo bolje razumeli kako delujejo EA, kje so razlike med EA in znali razvijati učinkovitejše EA.
- *»It is a remarkable fact that each algorithm emphasizes different features as being most important for a successful evolution process. ... Both ESs and EP concentrate on mutation as the main search operator, while the role of (pure random) mutation in canonical GAs is usually seen to be of secondary (if any) importance. On the other hand, recombination plays a major role in canonical GAs, is missing completely in EP, and is urgently necessary for use in connection to self-adaptation in ESs.« [Back and Schwefel 1993]*

# Eksploracija in eksploatacija

- Če želimo krmiliti eksploracijo in eksploatacijo jo moramo znati izmeriti.
- Toda merjenje eksploracije in eksploatacije je eden izmed odprtih problemov.
- Uporabljamo samo posredne (indirektne) mere:
  - ▣ Raznolikost (Diversity based measures),
  - ▣ Entropija (Entropy based measures),
  - ▣ Ocenitveno funkcijo (Fitness improvement based measures).

# Eksploracija in eksploatacija

- Če je raznolikost velika potem predpostavljamo, da je algoritem v fazi eksploracije.
- Če je raznolikost majhna potem predpostavljamo, da je algoritem v fazi eksploatacije.
- Ideja je preprosta in intuitivna, vendar dahe preveč grobo oceno.

$$Div_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |median(x^j) - x_i^j|$$

$$Div = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Div_j$$

$$XPL\% = \left( \frac{Div}{Div_{max}} \right) \times 100$$

$$XPT\% = \left( \frac{|Div - Div_{max}|}{Div_{max}} \right) \times 100$$

# Eksploracija in eksploatacija



- Prvi predlog neposredne (direktne) mere za eksploracijo in eksploatacijo:
- M. Črepinšek, S.-H. Liu, M. Mernik. Exploration and Exploitation in Evolutionary Algorithms: A Survey. ACM Computing Surveys, Vol. 45, No. 3, Article 35, 2013.
- Ko ustvarimo novega posameznika (potencialno rešitev) izmerimo podobnost z najbližjim sosedom (SCN - Similarity to the Closest Neighbor).

# Eksploracija in eksploatacija

$$SCN(ind_{new}, P) = d(ind_{new}, ind_{parent}), \text{ where } ind_{parent} \in P.$$

$$SCN(ind_{new}, P) = \min_{\substack{ind \in P \\ ind_{new} \neq ind.}} d(ind_{new}, ind).$$

$$SCN(ind_{new}, P') = \min_{\substack{ind \in P' \wedge (P' \subset P) \\ ind_{new} \neq ind.}} d(ind_{new}, ind).$$

$$SCN(ind_{new}, P^t) = \min_{\substack{ind \in P^t, t = 0..current\_gen \\ ind_{new} \neq ind}} d(ind_{new}, ind).$$

$$SCN(ind_{new}, P) > X \quad (\text{exploration})$$

$$SCN(ind_{new}, P) \leq X \quad (\text{exploitation})$$

# Eksploracija in eksploatacija

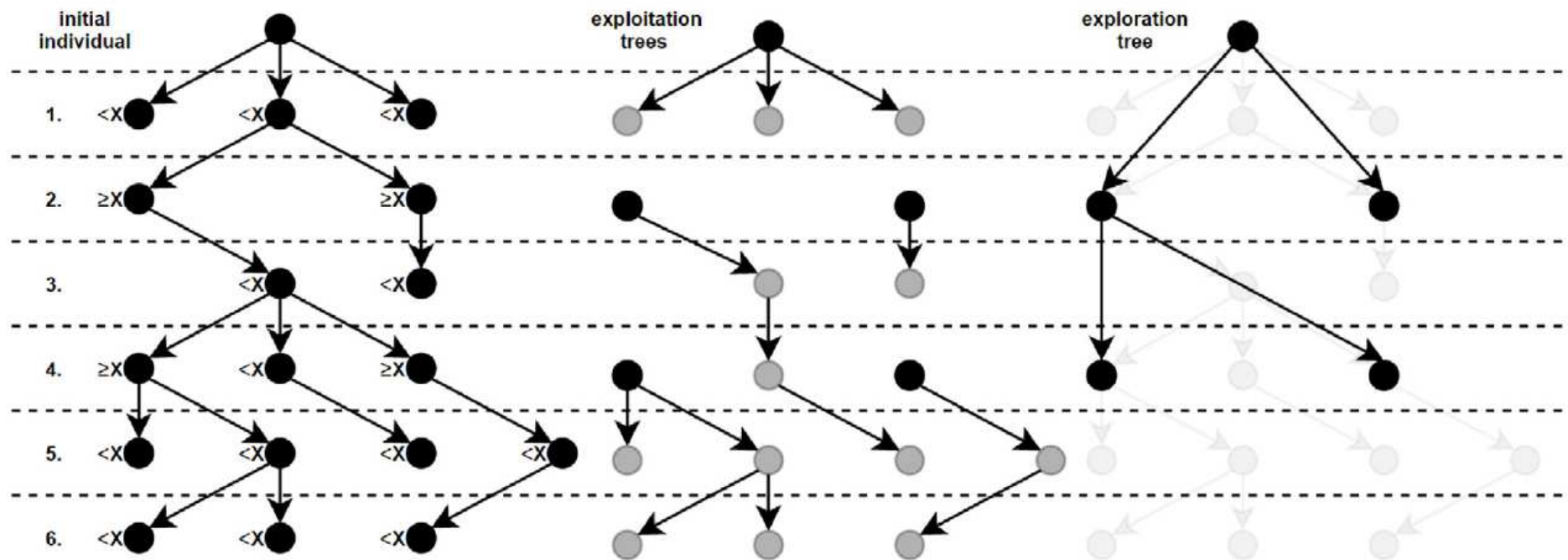


Fig. 6. An ancestry tree after six generations (Left), exploitation trees (Middle), an exploration tree (Right).

# Eksploracija in eksploatacija

- S-H. Liu, M. Mernik, D. Hrnčič, M. Črepinšek. A parameter control method of evolutionary algorithms using exploration and exploitation measures with a practical application for fitting Sovova's mass transfer model. *Applied Soft Computing* 13 (2013) 3792–3805

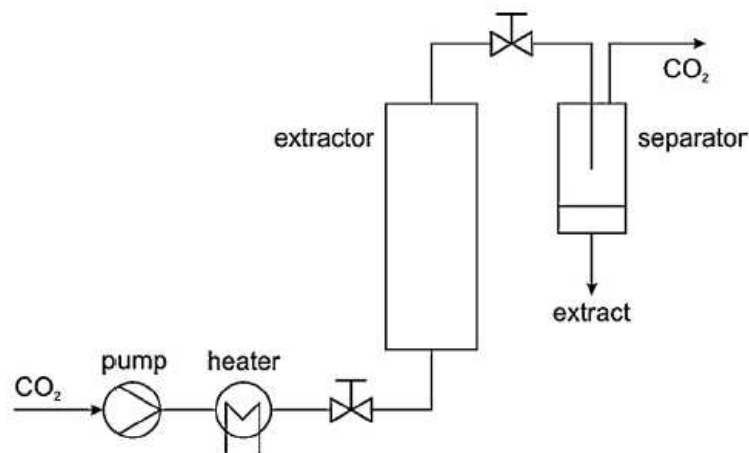


Fig. 2. Simple flow sheet of extraction process.

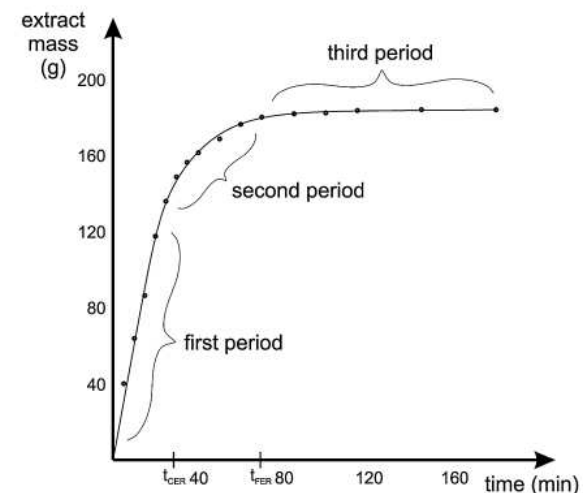


Fig. 3. Extraction curve separated into three periods.

# Eksploracija in eksploatacija

Table 8: Tuning, Fogarty, 1/5 Success Rule, Entropy, and EE Approaches for all 11 problems used in this study.

| Problem \ Approach | Tuning(F=0.9,CR=0.9) | Fogarty        | 1/5 Success    | Entropy        | EE-Driven      | Tuning(F=0.5,CR=0.9) |
|--------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| Problem 1          | 10.20175             | 9.57085        | 6.75992        | 5.63504        | <b>4.25477</b> | 5.91689              |
| Problem 2          | 5.27863              | 19.26213       | 8.65526        | 5.91153        | <b>4.78016</b> | 8.25526              |
| Problem 3          | 5.43129              | <b>1.87350</b> | 5.60174        | 5.03623        | 5.26445        | 5.45296              |
| Problem 4          | 4.34575              | <b>3.60396</b> | 4.17228        | 4.27496        | 3.93911        | 4.21624              |
| Problem 5          | 4.03892              | <b>2.41823</b> | 4.09157        | 3.95658        | 3.71876        | 4.09156              |
| Problem 6          | 4.23372              | 4.62380        | 4.13538        | 4.24591        | <b>3.72591</b> | 3.74330              |
| Problem 7          | 2.12554              | 5.73286        | 1.8158         | 3.48789        | <b>1.80487</b> | 3.34890              |
| Problem 8          | <b>6.94174</b>       | 6.96785        | <b>6.94174</b> | <b>6.94174</b> | <b>6.94174</b> | <b>6.94174</b>       |
| Problem 9          | <b>2.75873</b>       | 3.45808        | <b>2.75873</b> | <b>2.75873</b> | <b>2.75873</b> | 2.76058              |
| Problem 10         | <b>4.27539</b>       | 5.16555        | <b>4.27539</b> | <b>4.27539</b> | <b>4.27539</b> | 4.37109              |
| Problem 11         | <b>1.74750</b>       | 2.20000        | <b>1.74750</b> | <b>1.74750</b> | <b>1.74750</b> | 1.75619              |

Problem predlaganega pristopa:

- Prag  $X$  (threshold value  $X$ ), ki določa mejo med eksploracijo in eksploatacijo mora biti poznan v naprej.
- Okolico smo modelirali kot hiperkocko, ki ima enake dolžine v vseh dimenzijah.

# Eksploracija in eksploatacija

- Nov predlog neposredne (direktne) mere za eksploracijo in eksploatacijo:
- J. Jerebic, M. Mernik, S-H Liu, M. Ravber, M. Baketarić, L. Mernik, M. Črepinšek. A novel direct measure of exploration and exploitation based on attraction basins. Expert Systems with Applications, Volume 167, 1 April 2021, 114353.
- Atrakcijski bazen je del preiskovanega prostora, ki vsebuje atraktor – točko kateri težijo vse ostale točke tega bazena (lokalni optimum).

# Eksploracija in eksploatacija



- Večmodalni (multi-modal) preiskovalni prostor lahko razstavimo na več atrakcijskih bazenov. Vsak atrakcijski bazen pa vsebuje lokalni optimum, ki ga lahko dosežemo z lokalnim iskanjem.
- Enomodalni (uni-modal) preiskovalni prostor ima samo en atrakcijski bazen in samo en atraktor.

# Eksploracija in eksploatacija



- Z uporabo atrakcijskih bazenov lahko definiramo procesa eksploracije in eksploatacije na naraven način.
- Če je novo kreiran posameznik (rešitev) v istem bazenu kot njegov starš potem smo v procesu eksploatacije.
- Če je novo kreiran posameznik (rešitev) v drugem bazenu kot njegov starš potem smo v procesu eksploracije.

# Eksploracija in eksploatacija

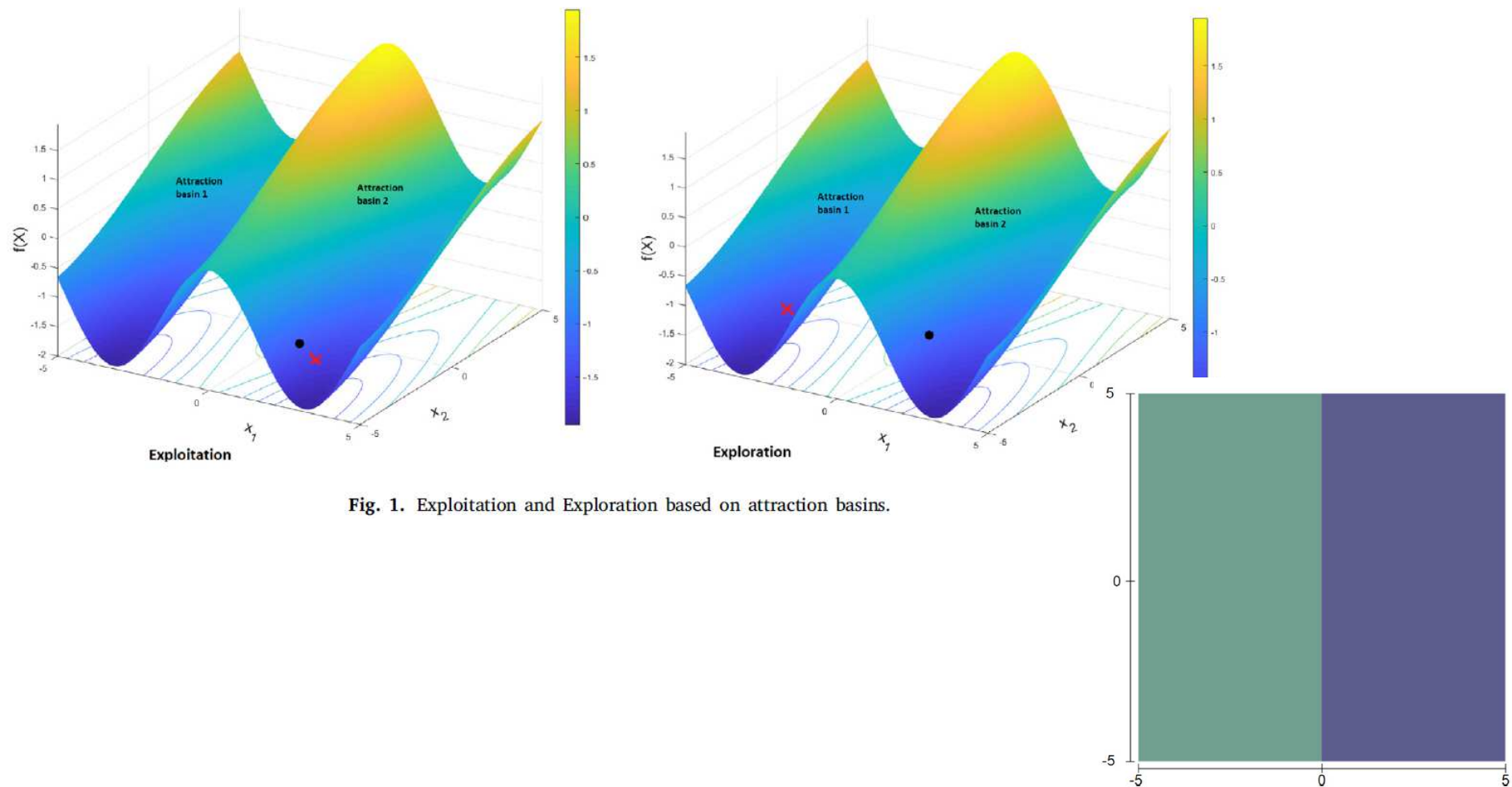


Fig. 1. Exploitation and Exploration based on attraction basins.

Fig. 2. Attraction basins for the Simple 2D function shown in Fig. 1.

# Eksploracija in eksploatacija

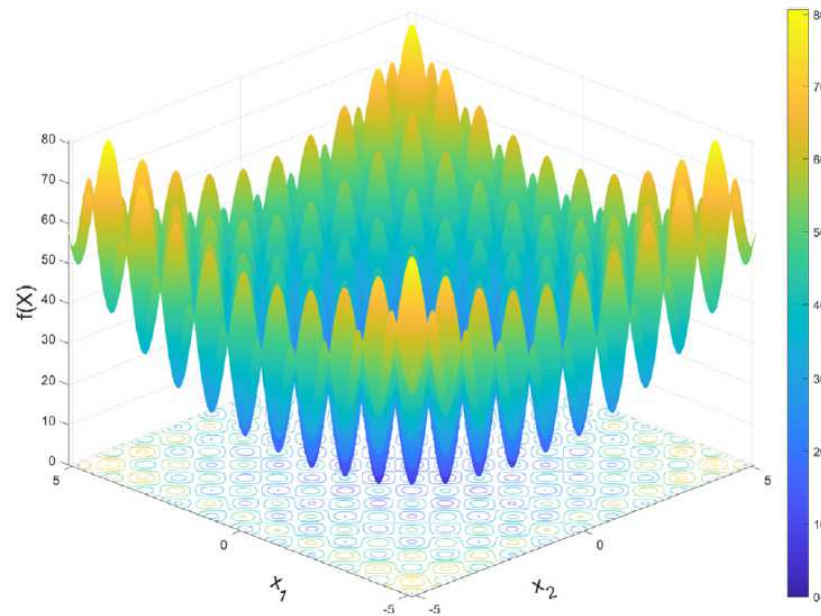


Fig. 3. The Rastrigin function.

$$f(x) = 10d + \sum_{i=1}^d (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i))$$
$$-5.12 \leq x_i \leq 5.12$$

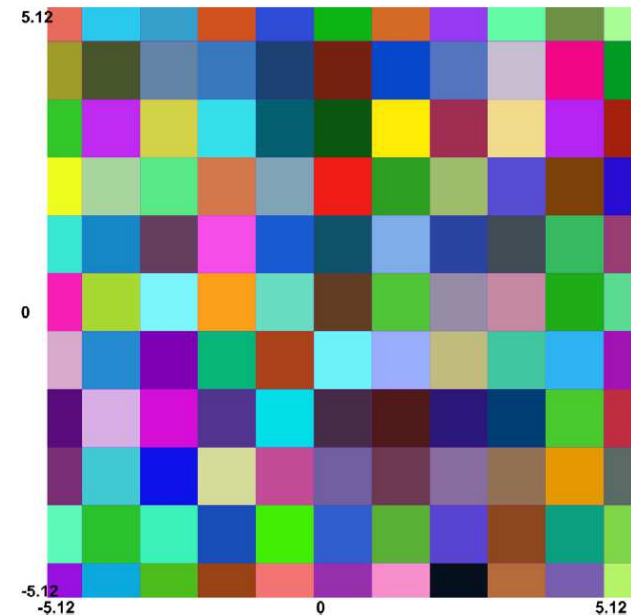


Fig. 4. Attraction basins for the Rastrigin function.

# Eksploracija in eksploatacija

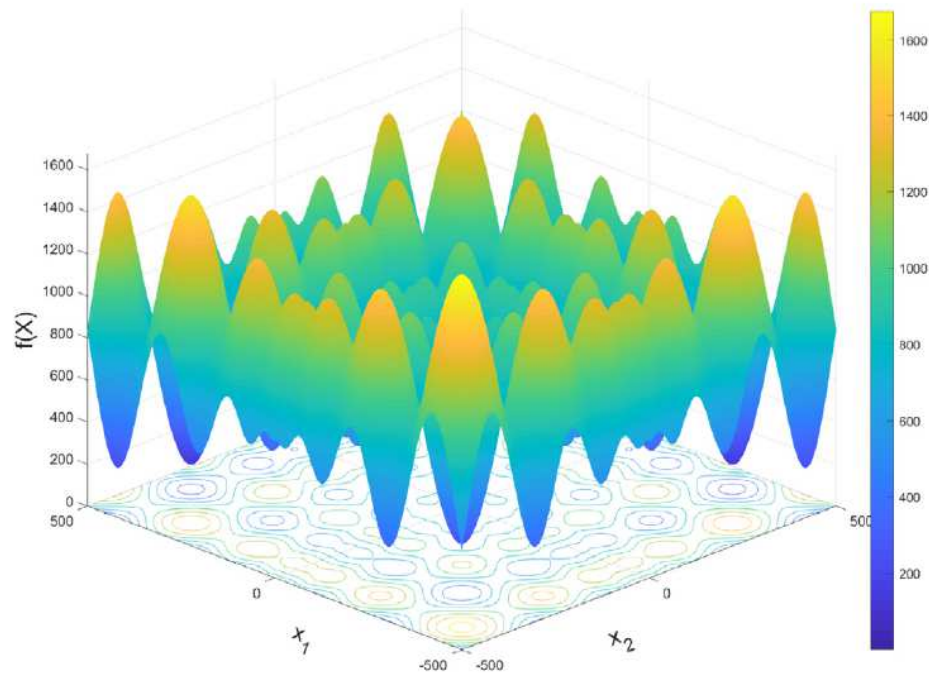


Fig. 9. The Schwefel function.

$$f(\mathbf{x}) = 418.9829d - \sum_{i=1}^d x_i \sin(\sqrt{|x_i|})$$
$$-500 \leq x_i \leq 500$$

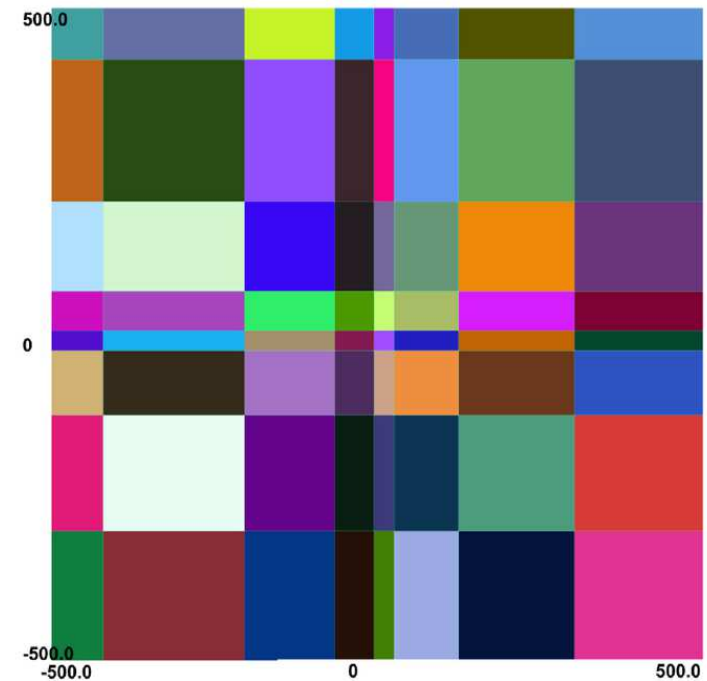


Fig. 11. Attraction basins for the Schwefel function.

# Eksploracija in eksploatacija

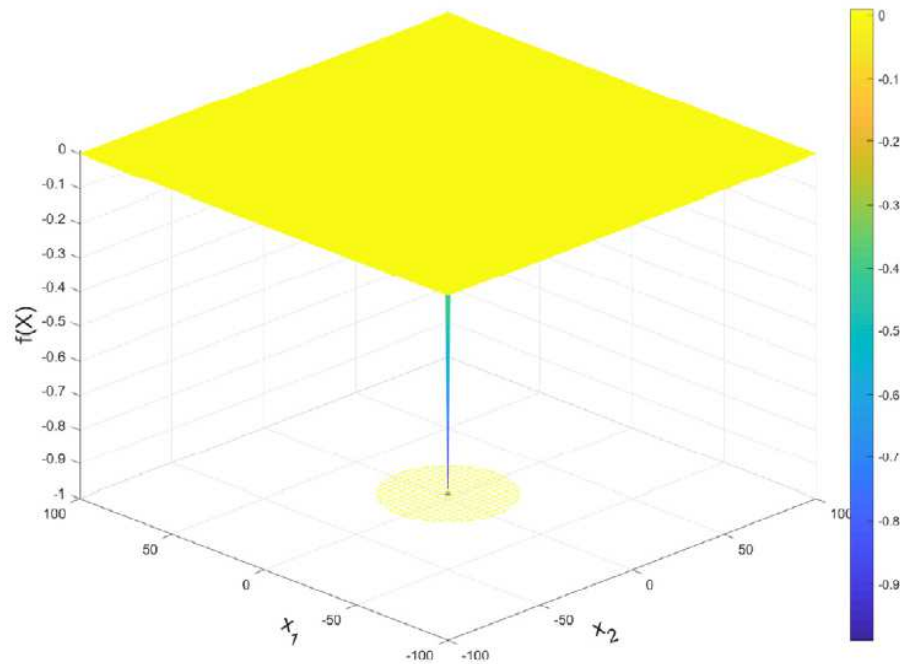


Fig. 14. The Easom function.

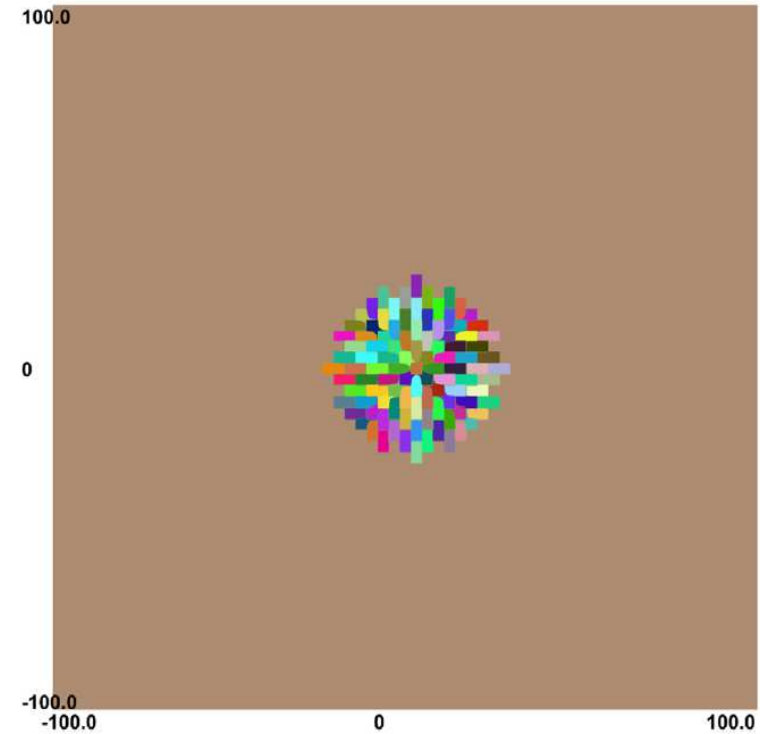


Fig. 16. Attraction basins for the Easom function.

$$f(x) = -\cos(x_1) \cos(x_2) \exp(-(x_1 - \pi)^2 - (x_2 - \pi)^2)$$
$$-100 \leq x_i \leq 100$$

# Eksploracija in eksploatacija

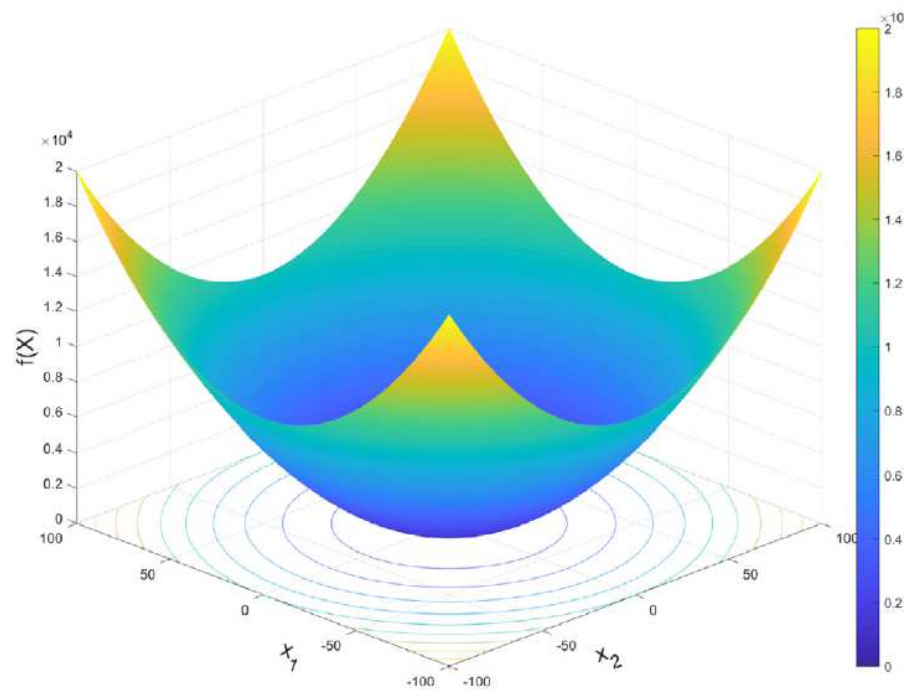


Fig. 19. The Sphere function.

$$f(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$$
$$-100 \leq x_i \leq 100$$

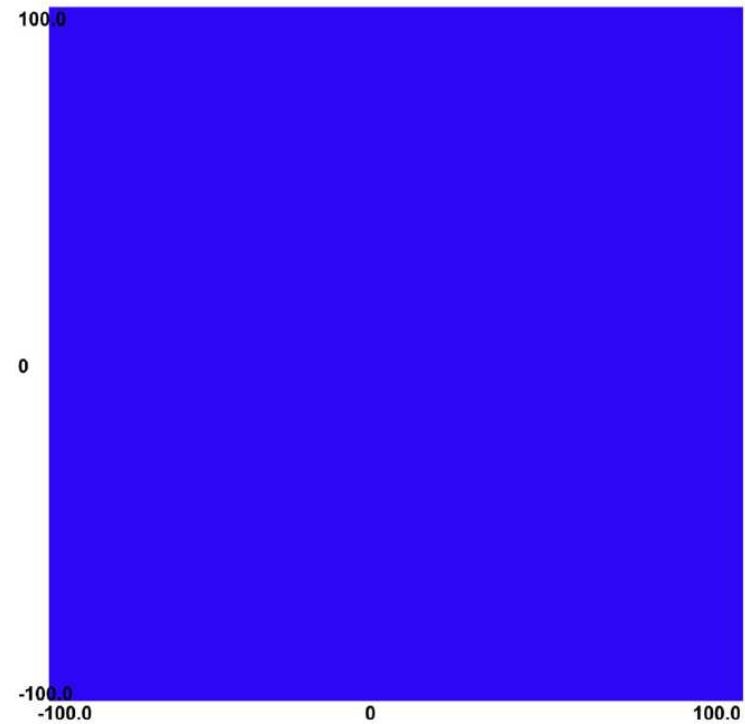


Fig. 21. Attraction basin for the Sphere function.

# Eksploracija in eksploatacija

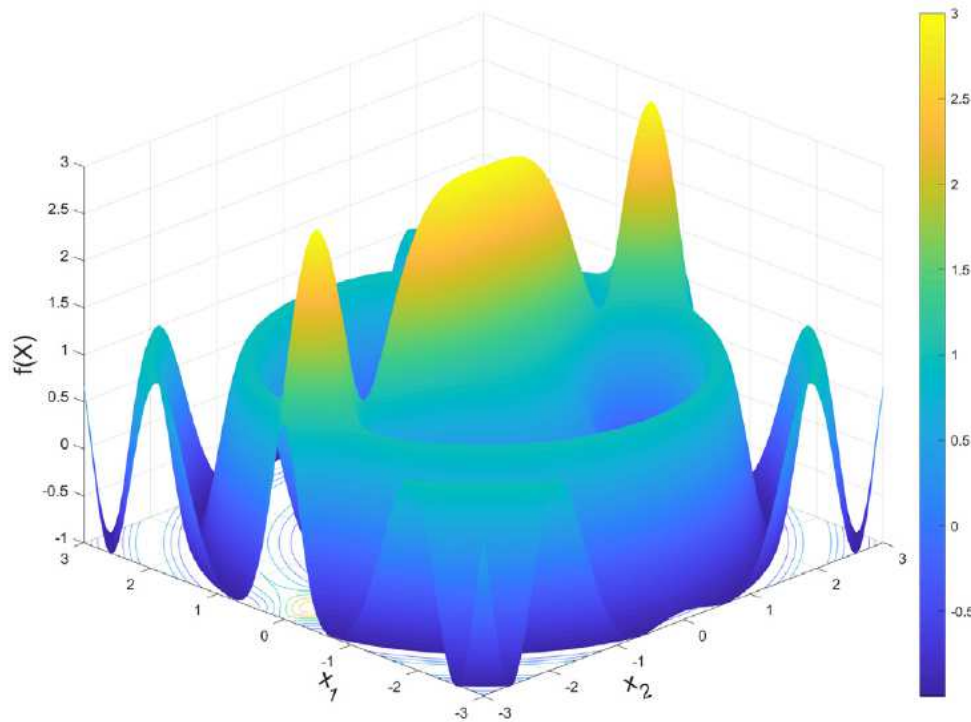


Fig. 40. Split Drop Wave function.

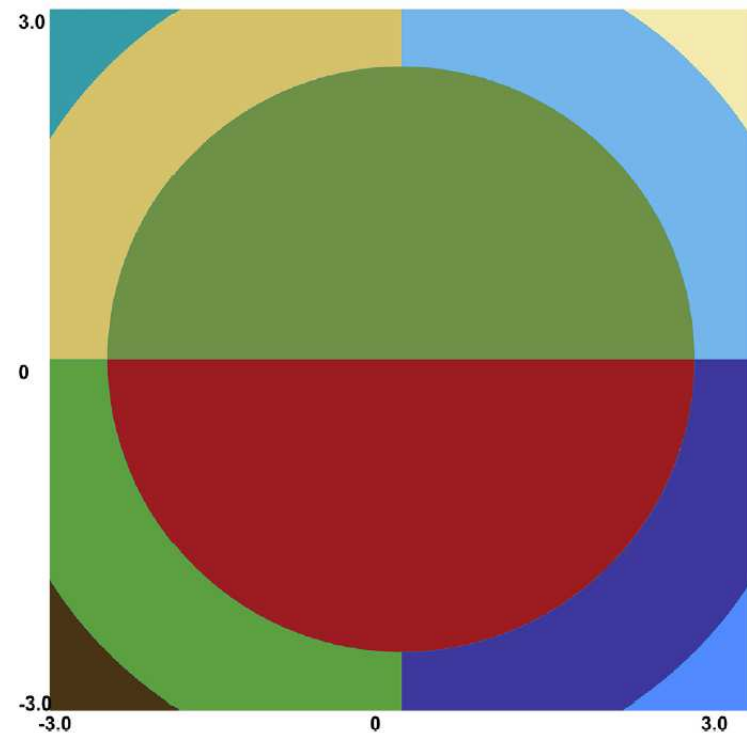


Fig. 42. Attraction basins for the Split Drop Wave function.

$$f(x) = \cos(x^2 + y^2) + 2 * e^{-10*y^2}$$
$$-3 \leq x_i \leq 3$$

# Eksploracija in eksploatacija

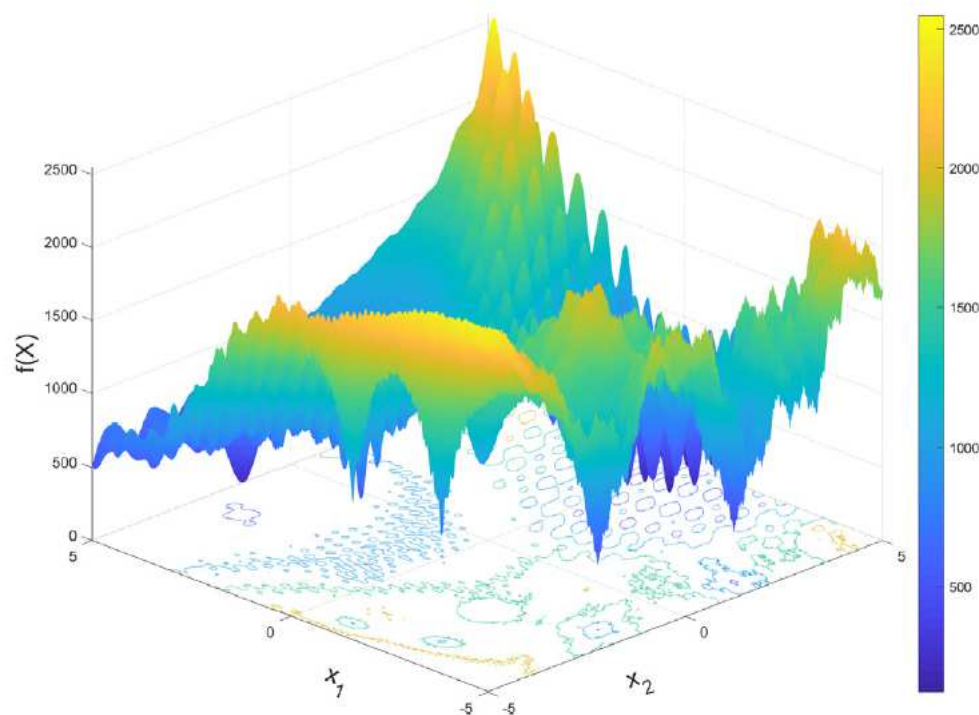


Fig. 45. Rotated Hybrid Composition function 1.

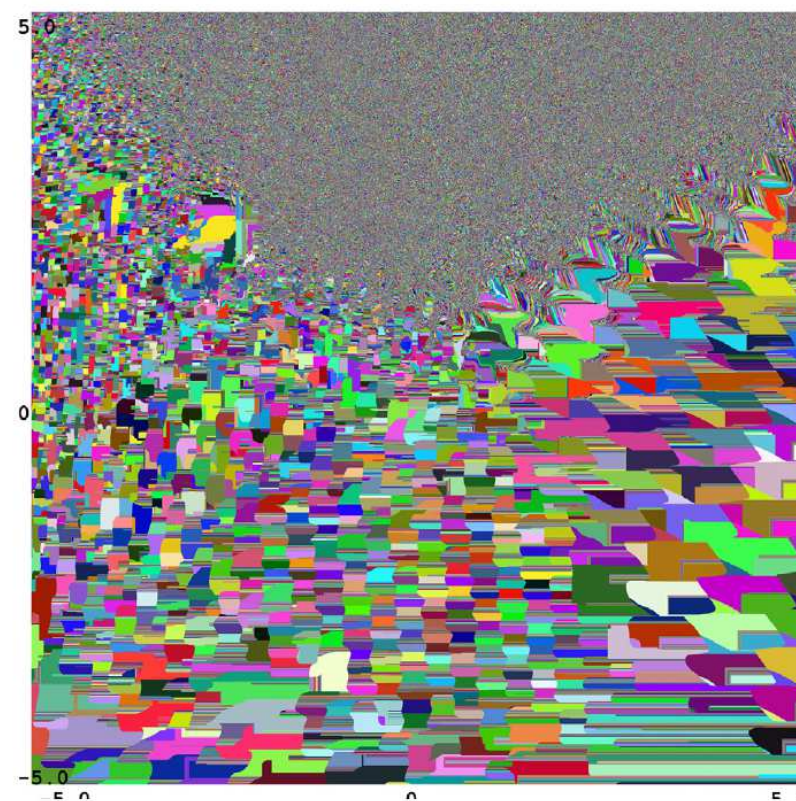


Fig. 47. Attraction basins for the Rotated Hybrid Composition function 1.

# Odprti problemi



- Mnogi EA uporabljajo enake operatorje, vendar trdijo da posnemajo drugačne vzorce. S pomočjo predlagane nove mere za eksploracijo in eksploatacijo bomo novitete lažje identificirali.
- Mnogi avtorji predlagajo nove operatorje, kjer trdijo da je razmerje med eksploracijo in eksploatacijo izboljšano. S pomočjo predlagane nove mere za eksploracijo in eksploatacijo bomo te trditve tudi dejansko lahko preverili.

# Odprti problemi

- Kateri EA uporabiti za dan problem? Glede na obliko in število atrakcijskih bazenov predvidevamo, da bomo lahko identificirali družino algoritmov, ki daje dobre rezultate nad takšno obliko atrakcijskih bazenov.
- Dandanes še zmeraj pogosto uravnavamo dobro razmerje med eksploracijo in eksploatacijo z nastavljanjem krmilnih parametrov. S pomočjo predlagane nove mere za eksploracijo in eksploatacijo bomo vpliv parametrov lažje opredelili.

# Odprti problemi



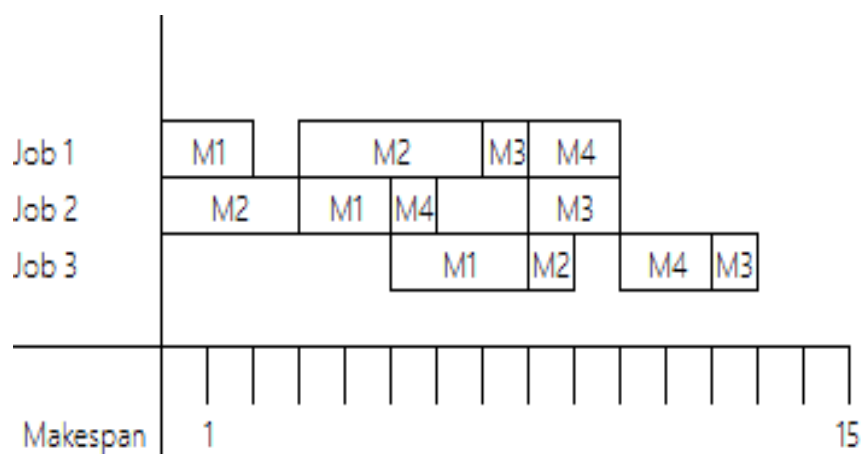
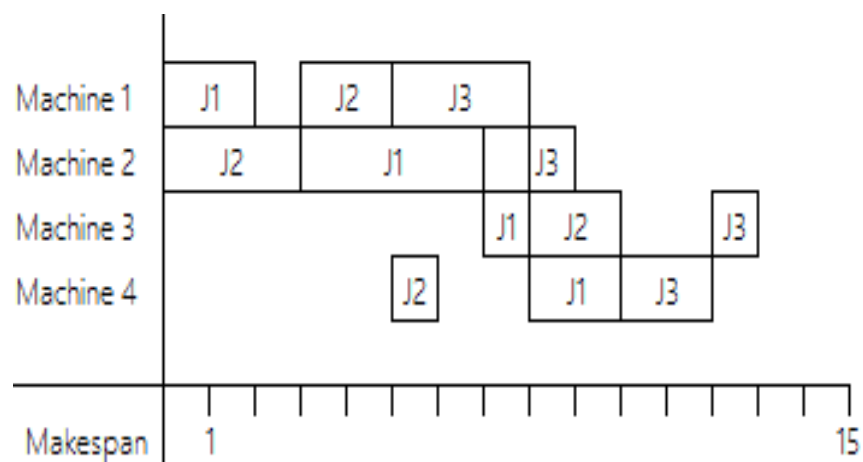
- Kako zagotavljati ponovljivost (Repeatability: same team, same experimental setup), obnovljivost (Reproducibility: different team, same experimental setup), in replikacijo (Replicability: different team, different experimental setup)?

M. Črepinšek, S.-H. Liu, M. Mernik. Replication and comparison of computational experiments in applied evolutionary computing: Common pitfalls and guidelines to avoid them. *Applied Soft Computing* 19 (2014) 161–170.

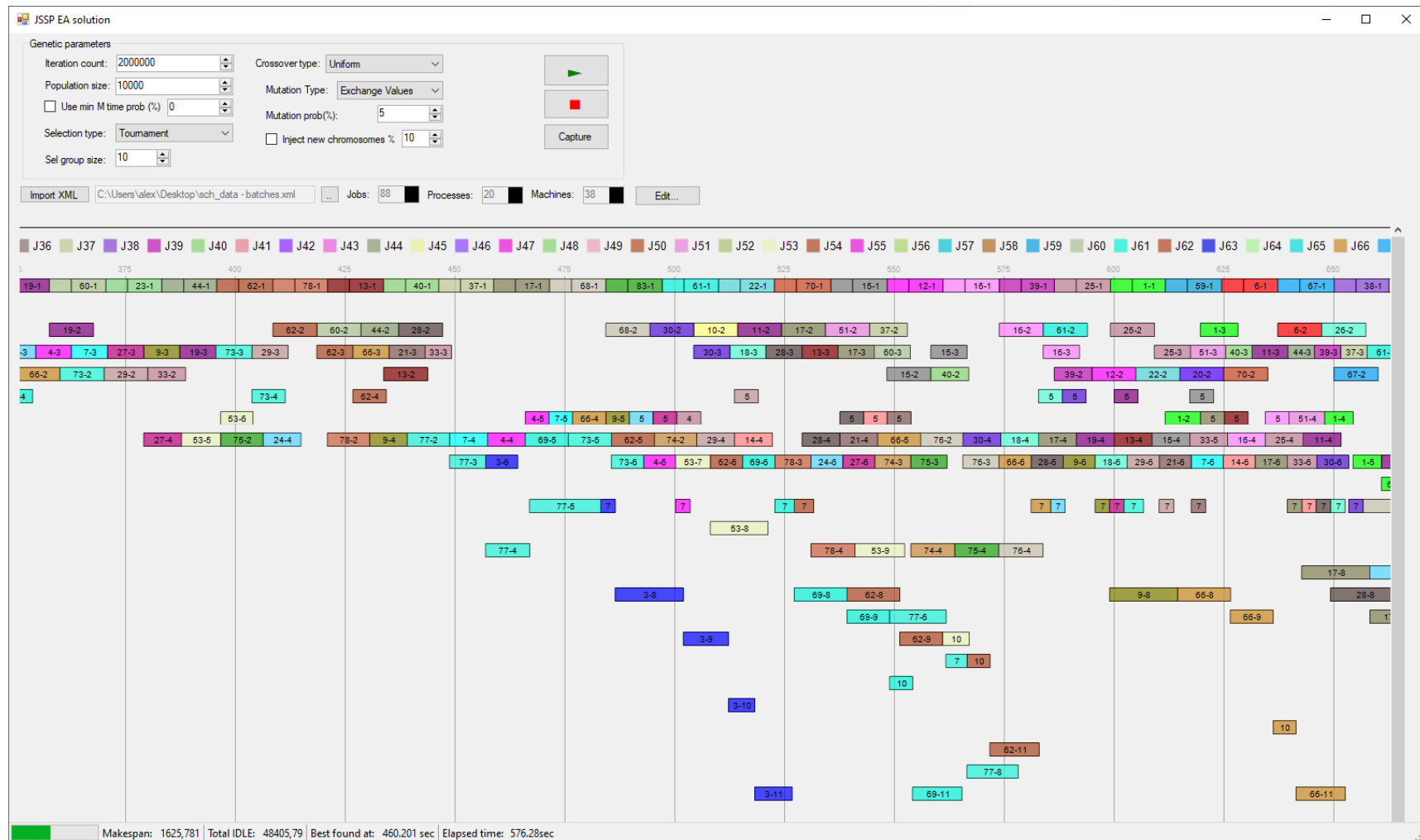
# Primer s tovarnami prihodnostmi

- S. Sršen, M. Mernik. A JSSP Solution for Production Planning Optimization Combining Industrial Engineering and Evolutionary Algorithms. Computer Science and Information Systems, 18(1), 349–378, 2021.
- Problem razporejanja delovnih nalogov (Job Shop Scheduling Problem - JSSP), kjer je  $n$  delovnih nalogov potrebno procesirati na  $m$  strojih tako, da bo čas dokončanja vseh delovnih nalogov minimalen.

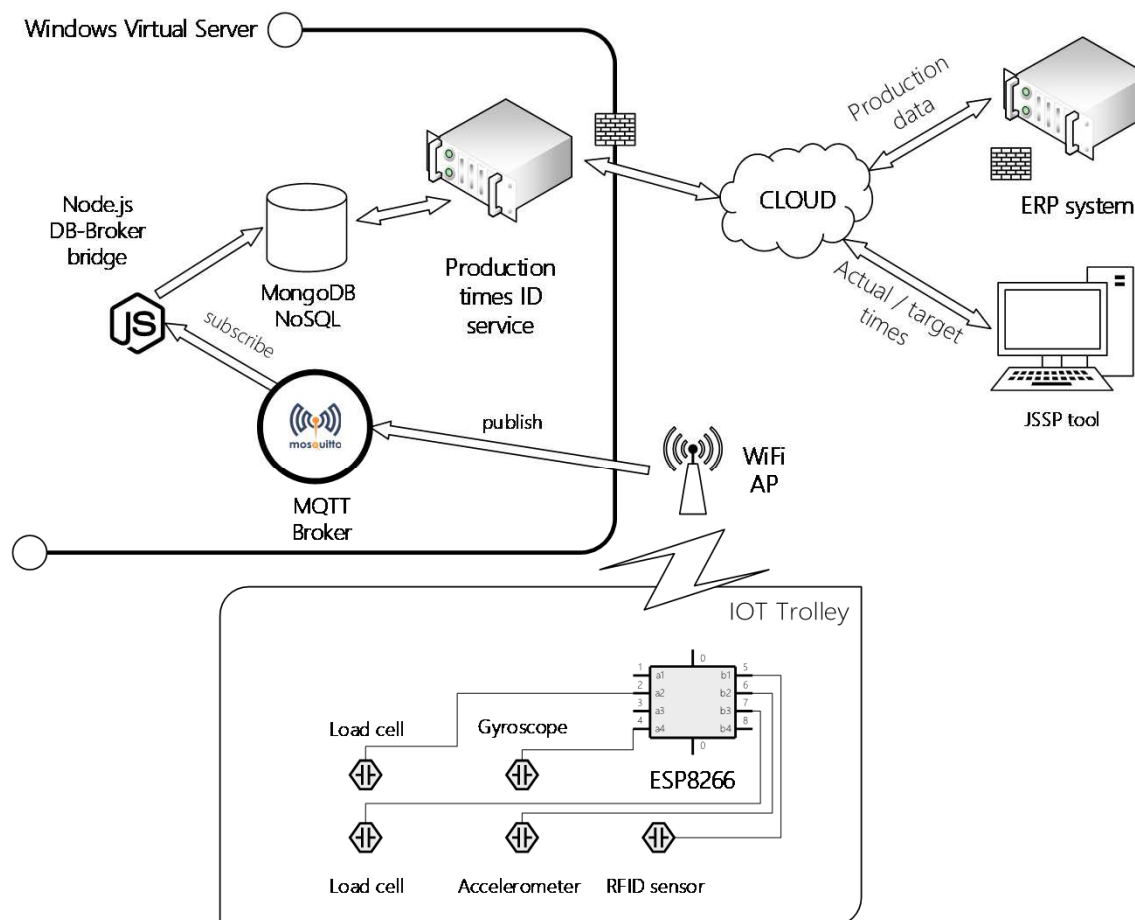
# Primer s tovarnimi prihodnostmi



# Primer s tovarnami prihodnostmi



# Primer s tovarnimi prihodnostmi



# Zaključek & vprašanja

- Eksploracija in eksploatacija sta osnovna koncepta vsakega iskalnega algoritma in prav presenetljivo je, da sta tako slabo razumljena med raziskovalci, ki uporabljajo evolucijske algoritme.

