

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 000

Genetski algoritmi inspirirani kvantnom mehanikom

Juraj Fulir

Zagreb, svibanj 2017.

Umjesto ove stranice umetnite izvornik Vašeg rada.
Da bi ste uklonili ovu stranicu obrišite naredbu \izvornik.

Zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Domagoju Jakoboviću na danoj mogućnosti vlastitog odabira teme završnog rada te iznimnom interesu za istu.

Zahvaljujem svojoj obitelji na svojoj podršci i strpljenju pogotovo tijekom kasnih noćnih sati.

Za kraj zahvaljujem Karlu Kneževiću, mag. ing., na kolegijalnoj pomoći.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Kvantni algoritmi i kvantna računala	2
1.2. Trenutno stanje u svijetu	2
1.2.1. D-Wave	2
1.2.2. IBM	2
2. Kvantni bit (qbit)	4
2.1. Princip rada	4
2.1.1. Blochova shema	5
2.1.2. Aproksimacija kvantnog stanja	6
2.2. Kvantni registar	7
3. Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom	8
3.1. Klasični genetski algoritam (CGA)	8
3.1.1. Dijelovi	8
3.1.2. Pseudokod	9
3.2. Kvantni genetski algoritam (QGA)	9
3.2.1. Dijelovi	9
3.2.2. Pseudokod	11
3.3. Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom (GAIQM)	11
3.3.1. Dijelovi	12
3.3.2. Pseudokod	13
3.3.3. Implementacija algoritma	13
3.3.4. Rad algoritma	13
4. Primjena	14
4.1. Traženje globalnog minimuma funkcije (FunctionMin)	14
4.1.1. Opis problema	14

4.1.2. Rezultat	14
4.2. Knapsack problem	14
4.2.1. Opis problema	14
4.2.2. Rezultat	15
4.3. Regresija neuronske mreže	15
4.3.1. Opis problema	15
4.3.2. Rezultat	15
4.4. COCO	15
4.4.1. Opis problema	15
4.4.2. Rezultat	15
5. Moguća nadogradnja	16
5.1. Paralelizacija	16
5.2. Podržavanje više-genotipskih jedinki	16
6. Zaključak	17
A. Parametri	18

1. Uvod

Sve do početka 19. stoljeća fizičari su imali deterministički pogled na svijet. Razvijanjem tehnologije koja je omogućavala promatranje sve manjih čestica primjećuju se čudni fenomeni koje dotadašnja fizika nije mogla opisati. Iz potrebe za objašnjavanjem tih neobičnih pojava razvijene su podjednako neobične teorije koje, iako su matematički dokazane, nisu olako prihvaćene na znanstvenoj sceni. Jedna takva teorija je pretpostavka diskretne prirode stvarnosti. Iz nje je nastalo jedno čitavo područje fizike zvano 'kvantna mehanika'. Iako su puno ranije postojala slična razmišljanja o diskretnim i točkastim česticama (Galilei, Bošković), do 19. stoljeća nije postojala ni tehnologija kojom bi se tvrdnje dokazale ni matematika kojom bi se tvrdnje opisale.

Početkom 19. stoljeća, Max Planck objavljuje *Plankov zakon zračenja* kojim rješava dugogodišnji problem zračenja crnog tijela, popularno nazvan "*ultraljubičasta katastrofa*". Definira povezanost izračene energije s valnom duljinom izračene svjetlosti, ali još bitnije definira diskretizirano zračenje u paketićima energije koje naziva 'količina', latinski 'kvantum'. Njegovim otkrićem kreće revolucija u fizici od kojih ću spomenuti samo nekoliko: otkriće fotoelektričnog efekta (Einstein), ispravljanje (redefiniranje) modela atoma (Rutherford, Bohr), otkriće dvojne prirode čestica (De Broglie), opisivanje valne prirode elektronske ljuske atoma (Heisenberg, Schrödinger, Born).

Danas je kvantni pogled na svijet vrlo uvriježen u krugu fizičara, ali i šire no još nije u potpunosti shvaćen. Unatoč tome korištenjem fenomena proizišlih iz kvantne fizike stvorili smo razne uređaje i alate koji su danas u širokoj primjeni. Neki takvi uređaji su: tunel dioda, laser, magnetska rezonancija i drugi.

Ukratko, kvantna mehanika je relativno mlada grana fizike, ali je uvelike utjecala na naš razvoj tehnologije, znanosti i shvaćanja svijeta u kojem živimo.

1.1. Kvantni algoritmi i kvantna računala

No Clone Theorem potvrđuje da nije moguće stvoriti kopiju postojećeg qbita odnosno nije moguće prenijeti kvantno stanje jednog qbita na drugi.

Primjenom qBita, teoretski je moguće ostvariti značajna ubrzanja nekih NP problema kvantnim algoritama (Shor-ov algoritam faktORIZACIJE cijelih brojeva, Grover-ov algoritam pretrage nesortiranih polja, ...). Jedan primjer primjene qbita je kvantni registar kao spremnik podataka, kojim se opisuje značaj superpozicije:

Pomoću 1 klasičnog registra veličine n bitova moguće je pohraniti 1 od mogućih 2^n vrijednosti.

Pomoću 1 kvantnog registra veličine n qBita moguće je pohraniti 2^n od mogućih 2^n vrijednosti, odnosno sve vrijednosti od jednom.

1.2. Trenutno stanje u svijetu

Postoje dvije tvrtke koje danas izrađuju i razvijaju kvantna računala.

1.2.1. D-Wave

Tvrtka D-Wave razvija i proizvodi kompaktne zatvorene sustave kvantnih računala. Trenutno najnoviji model kvantnog računala tvrtke D-Wave je 2000Q, podržava 2000 qbita i temelji se na adijabatskom kvantnom računanju. Taj princip vrlo je sličan principu kvantnog kaljenja. Radi se o topološkom pretraživanju prostora stanja za koji se mogu modelirati neki problemi. Ta su računala nedostupna široj javnosti isključivo radi cijene (15 milijuna američkih dolara 05.2017.) no neke su ih tvrtke ipak nabavile (Google, NASA, USRA, Volkswagen Group i ostali).

1.2.2. IBM

Razvivši svoje kvantno računalo, IBM nudi udaljeni pristup svojim kvantnim računalima. Javni paket uključuje pristup web aplikaciji za dizajniranje kvantnih krugova do 5 qbita te mogućnost izvršavanja eksperimenta na simulatoru ili stvarnom kvantnom procesoru. Pristup stvarnom kvantnom procesoru naplaćuje se 'virtualnim kreditom'

koji se dobije registracijom na sustav i vremenski obnavlja. Svako izvršavanje se naplaćuje ovisno o zadanom broju ponavljanja eksperimenta. Početkom 2017. godine omogućen je pristup računalu s čak 20 qbita preko web aplikacije.

2. Kvantni bit (qbit)

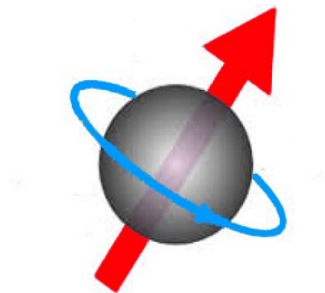
Kvantni bit je najmanja jedinica podatka u kvantnim računalima. Fizički je to zapravo sićušna čestica sa svojstvom superpozicije, jedne od temeljnih fizikalnih pojava u "kvantnom svijetu" čiju ćemo primjenu objasniti u nastavku.

2.1. Princip rada

Klasični bit pronalazimo u jednom od dva klasična stanja. Jednom postavljeno stanje se pamti i uvijek ga u njemu možemo pronaći. Njima gradimo binarni brojevni sustav pomoću kojeg zapisujemo podatke na računalu.

Kvantni bit ne pamti jedno klasično stanje već se on istovremeno nalazi u više različitih klasičnih stanja. To se svojstvo naziva superpozicija. Fizički gledano kvantni bit je čestica kojoj je pridružen kvantizirani spin. Spin je kvantizirana inačica kutne količine gibanja rotirajućeg tijela.

Kvantno stanje jednog qubita opisano je vektorom njegovog spina. Kvantno stanje opisuje vjerojatnost pronalaženja qbita u svakom od klasičnih stanja. Konkretno stanje dobivamo mjerenjem qbita kojim se uništava njegovo svojstvo superpozicije te dobivamo česticu u jednom stanju koju možemo koristiti poput klasičnog bita.

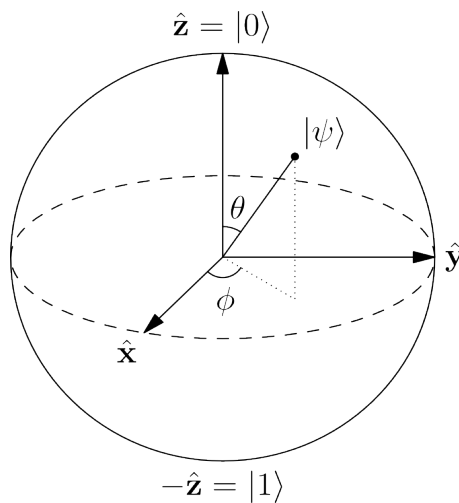


Slika 2.1: Vjerojatnost pronalaženja qbita u određenom stanju opisana je njegovim kvantnim stanjem (spinom).

Sustavi s kvantnim bitovima mogu biti definirani za proizvoljan brojevni sustav, no kako su današnja računala bazirana na binarnom brojevnom sustavu zanima nas definicija qbita s 2 stanja.

2.1.1. Blochova shema

Stanje qbita prikazujemo Blochovom shemom. Jedno kvantno stanje prikazujemo kao vektor iz središta sfere na njezinu površinu. Stanja u kojima možemo pronaći qbit prikazujemo polovima sfere koje definiramo sjecištima sfere i z-osi.



Slika 2.2: Blochova sfera

Na slici vidimo jedno kvantno stanje opisano vektorom. Matematički ga možemo opisati kao linearnu kombinaciju dvaju klasičnih stanja:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad (2.1)$$

Iz Blochove sfere popunjavamo konstante iz (2.1):

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \\ &= \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + (\cos(\phi) + i \sin(\phi)) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \end{aligned} \quad (2.2)$$

Vrijednosti α i β su normirane:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2.3)$$

Vrijednosti α i β predstavljaju vjerojatnosne amplitude pronalaženja qbita u stanju $|0\rangle$ i $|1\rangle$ respektivno. Iz vjerojatnosnih amplituda računamo vjerojatnosti pronalaženja qbita u svakom od stanja:

$$\begin{aligned}\Pr\{|0\rangle\} &= |\alpha|^2 = \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ \Pr\{|1\rangle\} &= |\beta|^2 = \sin^2 \frac{\theta}{2}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Kvantno stanje kraće možemo napisati u obliku vektora:

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

2.1.2. Aproximacija kvantnog stanja

Kvantno stanje prikazano na Blochovoj sferi opisano je u 3 dimenzije. Kako su operacije nad 3 dimenzije računski zahtjevne želimo pojednostaviti model kvantnog stanja. U simulaciji qbita jedino su nam važne vjerojatnosti pronalaženja qbita u određenom stanju. Ako pogledamo kvantno stanje opisano formulom (2.2) vidimo da α ovisi samo o kutu θ . Kombinacijom formula (2.2) i (2.3) zaključujemo kako β ovisi isključivo o α :

$$\begin{aligned}|\alpha|^2 + |\beta|^2 &= 1 \\ |\beta|^2 &= 1 - |\alpha|^2 \\ &= 1 - \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ &= \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\end{aligned}$$

Zaključujemo da je kut ϕ suvišan. To možemo vidjeti i na samoj Blochovoj sferi. Za fiksni kut θ mijenjanjem kuta ϕ rotiramo vektor oko z-osi i ne približavamo se niti jednom polu sfere.

Dobivamo sljedeću reprezentaciju kvantnog stanja qbita:

SLIKA 2D

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle\tag{2.5}$$

2.2. Kvantni registar

Kvantni registar, poput klasičnog registra, pohranjuje niz qbita te omogućuje ne-destruktivno čitanje i zapisivanje istih.

$$\begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & \cdots & q_i & \cdots & q_n \end{bmatrix}$$

Simulacija kvantnog registra je klasični registar koji pohranjuje vjerojatnosti qbita:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & \alpha_i & \cdots & \alpha_n \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \cdots & \beta_i & \cdots & \beta_n \end{bmatrix}$$

Nadalje možemo dodatno pojednostaviti, u klasični registar pohranjujemo samo kuteve qbita:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \cdots & \theta_i & \cdots & \theta_n \end{bmatrix}$$

3. Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom

3.1. Klasični genetski algoritam (CGA)

3.1.1. Dijelovi

Klasični genetski algoritam zahtjeva nekoliko osnovnih dijelova:

- Genotip
- Operator križanja
- Operator mutacije
- Evaluator

Genotip

Podatkovna struktura koja opisuje jednu jedinku. Mora biti kompatibilna s evaluatorom i zahtjeva sebi kompatibilne operatore. Sadrži niz bitova:

$$\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & \cdots & b_i & \cdots & b_n \end{bmatrix}$$

Operator križanja

Operator koji izvodi križanje (razmjenu) genetskog materijala danih jedinki. Odabire se točka koja će podijeliti kromosom roditelja na 2 dijela. Stvore se djeca kojima je

jedna polovica roditelja zamijenjena polovicom drugog roditelja.

$$\begin{aligned} \text{Roditelj1} &: \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{11} & \mathbf{b}_{12} & | & b_{13} & \cdots & b_{1i} & \cdots & b_{1n} \end{bmatrix} \\ \text{Roditelj2} &: \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{21} & \mathbf{b}_{22} & | & b_{23} & \cdots & b_{2i} & \cdots & b_{2n} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dijete1} &: \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{21} & \mathbf{b}_{22} & b_{13} & \cdots & b_{1i} & \cdots & b_{1n} \end{bmatrix} \\ \text{Dijete2} &: \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{11} & \mathbf{b}_{12} & b_{23} & \cdots & b_{2i} & \cdots & b_{2n} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Operator mutacije

Operator koji vrši izmjenu genetskog materijala dane jedinke. Odabire se bit te se invertira.

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \mathbf{b}_3 & \cdots & b_i & \cdots & b_n \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \overline{\mathbf{b}_3} & \cdots & b_i & \cdots & b_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Evaluator

Procedura koja jedinci pridružuje vrijednost dobrote (fitness). Gradi se na temelju zadanog problema i ne ovisi o implementaciji algoritma.

3.1.2. Pseudokod

U ovom primjeru gledamo pseudokod turnirskog algoritma s konstantnom veličinom populacije (SteadyStateTournament).

3.2. Kvantni genetski algoritam (QGA)

3.2.1. Dijelovi

Kvantni genetski algoritam uz svoje specifične operatore sadrži i dijelove slične onima iz CGA:

- Kvantni genotip (kvantni registar)
- Kvantna rotacijska vrata
- Inicijalizator populacije
- Operator mjerenja qbita
- Evaluator

Algorithm 1 Klasični genetski algoritam (CGA)

Input: *parametri*
Inicijaliziraj Populaciju $P(0)$
Evaluiraj Populaciju $P(0)$
 $B = \text{DohvatiNajboljegIz } P(0)$
while *NijeDovoljnoDobar* B **do**
 $t \leftarrow t + 1$
 OdaberiRoditeljeIz $P(t)$
 OperatorKrizanja
 OperatorMutacije
 Evaluiraj Populaciju $P(t)$
end while
return B

Kvantni genotip (kvantni registar)

Podatkovna struktura koja opisuje jednu jedinku. Od klasičnog registra se razlikuje u principu pohrane podataka (superpozicijom qbita). Zahtjeva operatore sposobne za baratanje qbitima. Dodatno zahtjeva i klasični genotip koji može pohraniti izmjerene vrijednosti qbita i koji je pogodan evaluatoru.

$$\begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & \cdots & q_i & \cdots & q_n \end{bmatrix}$$

Kvantna rotacijska vrata

Operator koji vrši unaprjeđenje populacije transformiranjem kromosoma. Matematički ih možemo prikazati kao matrice. Matrice moraju biti unitarne odnosno mora vrijediti: $UU' = I$.

Prisjetimo se da smo kvantno stanje qbita opisali vektorom na Blochovoj sferi. Želimo li promijeniti stanje qbita moramo rotirati svojstveni vektor. Upravo nam tome služe kvantna rotacijska vrata. Najvažnija vrata su vrata identiteta i Paulijeva X, Y i Z vrata:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Matematički promjenu kvantnim rotacijskim vratima ostvarujemo umnoškom kvantnog stanja zapisanog u vektor i samih vrata, npr. ostvarenje zrcaljenja oko x-osi:

$$X \cdot |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Inicijalizator populacije

Svrha inicijalizatora populacije je postaviti qbite u superpoziciju. Ostvaruje se Haddamardovim H vratima:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Matematički prikaz postavljanja qbita u superpoziciju:

$$H \cdot |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \alpha + \beta \\ \alpha - \beta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Operator mjerenja qbita

Operator mjerenja qbita uništava kvantno svojstvo qbita i vraća klasičnu vrijednost.

Evaluator

Evaluator CGA je kompatibilan s QGA.

Operator kvantnih rotacijskih vrata

Operator koji vrši napredak populacije. Prima jedinku i najbolju jedinku trenutne populacije i njima pripadne vrijednosti dobrote te "usmjerava" jedinku prema najboljoj.

3.2.2. Pseudokod

3.3. Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom (GAIQM)

Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom je simulacija QGA. U literaturi ga možemo pronaći i pod nazivom *Quantum inspired genetic algorithm (QIGA)*.

Algorithm 2 Kvantni genetski algoritam (QGA)

Input: *parametri*
Inicijaliziraj Populaciju $Q(0)$
Izmjeri Populaciju $Q(0) \rightarrow P(0)$
Evaluiraj Populaciju $P(0)$
 $B = \text{DohvatiNajboljegIz } P(0)$
while *NijeDovoljnoDobar* B **do**
 $t \leftarrow t + 1$
 Izmijeni Kvantnim Vratima $Q(t)$
 Izmjeri Populaciju $Q(t) \rightarrow P(t)$
 Evaluiraj Populaciju $P(t)$
 $B = \text{DohvatiNajboljegIz } P(t)$
end while
return B

3.3.1. Dijelovi

Dijelovi GAIQM i QGA su identični, ali imaju različite implementacije:

- Kvantni genotip (kvantni registar)
- Kvantni operator mutacije
- Operator kvantnih rotacijskih vrata
- Evaluator

Kvantni genotip (kvantni registar)

Podatkovna struktura koja opisuje jednu jedinku. Od klasičnog registra se razlikuje u principu pohrane podataka (superpozicijom qbita). Zahtjeva operatore sposobne za baratanje qbitima. Dodatno zahtjeva i klasični genotip koji može pohraniti izmjerene vrijednosti qbita i koji je pogodan evaluatoru.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \cdots & \theta_i & \cdots & \theta_n \end{bmatrix}$$

Kvantni operator mutacije

Operator funkcionalno jednak klasičnom operatoru mutacije, ali prilagođen upravljanju s nizom qbita.

Evaluator

Evaluator CGA je kompatibilan s QGA.

Operator kvantnih rotacijskih vrata

Operator koji vrši napredak populacije. Prima jedinku i najbolju jedinku trenutne populacije i njima pripadne vrijednosti dobrote te "usmjerava" jedinku prema najboljoj.

3.3.2. Pseudokod

Algorithm 3 Genetski algoritam inspiriran kvantnom mehanikom (GAIQM)

Input: *parametri*

Inicijaliziraj Populaciju $P(0)$

Izmjeri Populaciju $P(0)$

Evaluiraj Populaciju $P(0)$

$B = \text{DohvatiNajboljegIz } P(0)$

while *NijeDovoljnoDobar* B **do**

$t \leftarrow t + 1$

OperatorKvantnihRotacijskihVrata $B, P(t)$

OperatorMutacije $P(t)$

Evaluiraj Populaciju $P(t)$

end while

return B

3.3.3. Implementacija algoritma

Algoritam je implementiran na aproksimaciji qbita i kvantnog registra. Genotip sadrži kvantni registar koji pamti samo kuteve kvantnih stanja:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \cdots & \theta_i & \cdots & \theta_n \end{bmatrix}$$

3.3.4. Rad algoritma

4. Primjena

4.1. Traženje globalnog minimuma funkcije (Function-Min)

4.1.1. Opis problema

Zadane su netricijalne funkcije u 3 dimenzije kojima je potrebno pronaći točku minimuma. Ovaj problem koristi genotip *Binary*.

Zadane funkcije:

- Kvadratna
- Schaffer-ova F6 funkcija
- Griewangk
- Ackley
- Rastrigin
- Rosenbrock
- Schaffer-ova F7 funkcija

4.1.2. Rezultat

4.2. Knapsack problem

4.2.1. Opis problema

Zadana je nosivost torbe (knapsack) i popis stvari i njima pripadnih težina. Potrebno je pronaći najbolju kombinaciju stvari uz uvjet da je zadovoljena nosivost torbe. Ovaj problem koristi genotip *BitString*.

4.2.2. Rezultat

4.3. Regresija neuronske mreže

4.3.1. Opis problema

Za zadane ulazi/izlazi brojčane podatke potrebno je pronaći težine veza između neurona neuronske mreže (učenje neuronske mreže). Ovaj problem koristi genotip *FloatingPoint*.

4.3.2. Rezultat

4.4. COCO

4.4.1. Opis problema

Usporedba s ostalim optimizacijskim algoritmima

4.4.2. Rezultat

5. Moguća nadogradnja

5.1. Paralelizacija

Stvaranjem više nezavisnih populacija jedinki te povremenom razmjenom najboljih jedinki između populacija poboljšava se rad algoritma.

5.2. Podržavanje više-genotipskih jedinki

Trenutno je ostvarena podrška jedinki s jednim genotipom. Podršku više genotipa moguće je ostvariti izmjenom 'prilagodnika' unutar algoritma te prikladnim zastavicama za odabir genotipa koji će poprimati vrijednosti kvantnog registra.

6. Zaključak

Zaključak.

Dodatak A

Parametri

U nastavku je dan opis svih parametara. Obavezni parametri označeni su **podebljanim tekstom**.

Tablica A.1: Parametri za <GAIQM>

Naziv	Tip	Pretp. vr.	Opis
<i>ubound</i>	<i>double</i>	0.1	Gornja granica zakreta qbita
<i>lbound</i>	<i>double</i>	0.01	Donja granica zakreta qbita
<i>disaster</i>	<i>uint</i>	-1	Broj ponovljenih vrijednosti operatora katastrofe (vrijednost -1 gasi operator katastrofe)

Tablica A.2: Parametri za <QuantumRegister>

Parametri *dimension*, *ubound*, *lbound* i *precision* naslijeđeni su iz genotipa Binary.

Naziv	Tip	Pretp. vr.	Opis
dimension	<i>uint</i>	-	Količina realnih brojeva genotipa
ubound	<i>double</i>	-	Maksimalna vrijednost brojeva u genotipu
lbound	<i>double</i>	-	Minimalna vrijednost brojeva u genotipu
<i>precision</i>	<i>uint</i>	-	Broj znamenki nakon decimalne točke
<i>initAngle</i>	<i>double</i>	0.5	Početni kut qbita (početno kvantno stanje), množi se s π
<i>mut.quantum_</i> <i>inversion</i>	<i>double</i>	0.5	Udio vjerojatnosti poziva operatora
<i>mut.quantum_</i> <i>swap</i>	<i>double</i>	0.5	Udio vjerojatnosti poziva operatora

Tablica A.3: Parametri za problem *Knapsack*

Parametri *dimension*, *ubound*, *lbound* i *precision* naslijeđeni su iz genotipa Binary.

Naziv	Tip	Pretp. vr.	Opis
eval.knapsackSize	<i>double</i>	-	Veličina (nosivost) torbe
eval.itemsFile	<i>string</i>	-	Putanja do datoteke s definicijama težina i cijene predmeta
<i>eval.punishmentFactor</i>	<i>double</i>	-	Faktor kojim se množi prekoračenje nosivosti torbe

Genetski algoritmi inspirirani kvantnom mehanikom

Sažetak

Cilj rada je objasniti koncept pohrane i manipulacije podacima na kvantnim računalima, mogućnost primjene na genetske algoritme na klasičnim računalima te proširenje ECF-a dotičnim algoritmom. Algoritam je primjenjen na 3 različita problema (traženje minimuma, knapsack, regresija neuronske mreže). Rezultati ukazuju na ...

Ključne riječi: genetski algoritam, kvantna mehanika, qbit, knapsack, neuronska mreža.

Genetic algorithm inspired by quantum mechanics

Abstract

ENGLISH.

Keywords: genetic algorithm, quantum mechanics, qbit, knapsack, neural network.