

Mehanizem samoprilagodljivih krmilnih parametrov v algoritmu diferencialne evolucije

Borko Bošković, Janez Brest, Damjan Casar

Univerza v Mariboru
Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko
Inštitut za računalništvo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: borko.boskovic@uni-mb.si

Self-adaptive mechanism of control parameters in the differential evolution algorithm

The article presents self-adapting mechanism for control parameters of the differential evolution algorithm. The mechanism in the process of self-adaptation includes control parameters F and Cr . Mechanism was tested with the test functions which were taken from the Special Session and Competition on High-Dimension Real-Parameter Optimization (CEC 2008). The gained results were compared with the basic differential evolution algorithm. Based on the results we can conclude that the introduced mechanism improve efficiency of the differential evolution algorithm on the selected test functions.

1 Uvod

V članku je predstavljen samoprilagodljivi mehanizem krmilnih parametrov algoritma diferencialne evolucije (DE). V proces samoprilagajanja mehanizem vključuje krmilna parametra F in Cr . Njuni vrednosti določata selekcija in naključni generator števil po Gaussovi porazdelitvi. Algoritem smo preizkusili s pomočjo funkcij F1-F6 iz posebne sekcije mednarodnega simpozija evulucijskega računanja (CEC 2008 Special Session and Competition on High-Dimension Real-Parameter Optimization). Dobljene rezultate smo primerjali z osnovnim algoritmom DE. Na osnovi rezultatov lahko sklepamo, da je načrtovan mehanizem na preizkušeni funkcijah izboljšal učinkovitost algoritma DE.

Algoritem DE je eden od učinkovitejših evulucijskih algoritmov. Žal pa je učinkovitost tega algoritma odvisna od krmilnih parametrov. Tako mora uporabnik algoritma, da dobi dobre rezultate pri reševanju določenega problema, algoritem večkrat zagnati in ugotoviti dobre krmilne parametre. Da bi se temu izognili, smo algoritmu dodali samoprilagodljivi mehanizem krmilnih parametrov. Osnovni algoritem DE vsebuje tri krmilne parametre Np , F in Cr . Np določa velikost populacije, F je krmilni parameter križanja, Cr pa predstavlja krmilni parameter mutacije. Od teh treh parametrov v našem samoprilagodljivem mehanizmu se uporabljata F in Cr .

Nadaljevanje članka je organizirano na naslednji način. V 2. poglavju predstavljamo algoritem DE in

vpeljan mehanizem samoprilagajanja. Eksperiment in njegove rezultate predstavljamo v 3. poglavju. Članek zaključimo s 4. poglavjem, kjer podamo zaključke in smernice za nadaljnje delo.

2 Algoritem

Algoritem DE je relativno preprost in učinkovit evulucijski algoritem [6, 5, 7, 4]. Od preostalih evulucijskih algoritmov se razlikuje po tem, da uporablja hitre in preproste operacije nad vektorji realnih števil oz. posamezniki evulucijskega procesa. Algoritem izvaja inicializacijo, križanja, mutacijo, popravljanje in selekcijo nad Np D -dimenzionalnimi posamezniki, kot prikazuje algoritem 1. Poleg že predstavljenih simbolov, algoritem vsebuje vektorja \vec{x}_{min} in \vec{x}_{max} , ki določata spodnje in zgornje meje iskalnih intervalov za vsako dimenzijo problema. f je funkcija oz. problem, ki ga rešujemo. Oznaka g predstavlja trenutno generacijo. Oznaki FES in MAX_FES predstavljata število ovrednotenih posameznikov in maksimalno število ovrednotenih posameznikov, ki predstavlja tudi kriterij za končanje evulucijskega procesa. Vektorji \vec{x}_i^g , \vec{m}_i^g , k_i^g in \vec{t}_i^g predstavljajo vektor populacije, mutiran vektor, križan vektor in nov vektor, ki se bo primerjal z vektorjem iz populacije.

V algoritmu DE so bili uporabljeni različni koncepti samoprilagajanja [4, 8, 3, 1, 2]. Način delovanja algoritma DE skupaj z našim samoprilagodljivim mehanizmom bomo podrobneje predstavili v nadaljevanju tega poglavja. Samoprilagodljiv mehanizem je

Algorithm 1 Algoritem diferencialne evolucije

```
1: inicializacija( $Np, D, \vec{x}_{min}, \vec{x}_{max}, f$ );
2:  $g = 0$ ;
3: for  $FES = Np$ ;  $FES < MAX\_FES$ ;  $FES += Np$  do
4:   for  $i = 1$  to  $Np$  do
5:      $\vec{m}_i^g = \text{mutacija}(i, Np, D)$ ;
6:      $k_i^g = \text{križanje}(\vec{x}_i^g, \vec{m}_i^g, D)$ ;
7:      $\vec{t}_i^g = \text{popravljanje}(k_i^g, D, \vec{x}_{min}, \vec{x}_{max})$ ;
8:      $\vec{x}_i^{g+1} = \text{selekcija}(\vec{x}_i^g, \vec{t}_i^g, D, f)$ ;
9:   end for
10:   $g ++$ ;
11: end for
```

načrtovan tako, da sta se vsakemu posamezniku dodala samoprilagodljiva krmilna parametra aritmetične sredine Gaussove porazdelitve F_i^g in Cr_i^g .

2.1 Inicializacija

Inicializacija nastavi začetne vrednosti posameznikom in samoprilagodljivim parametrom kot prikazuje enačba (1). Elementi vektorjev se izberejo s pomočjo uniformnega naključnega generatorja števil na iskalnih intervalih. Samoprilagodljivi parametri F_i^g in Cr_i^g pa se nastavijo na vrednosti 0,5 in 0,9, glede na priporočila iz literature [6].

$$\begin{aligned} x_{i,j}^0 &= x_{min,j} + (x_{max,j} - x_{min,j}) \cdot rand_{i,j}[0,1] \\ F_i^0 &= 0,5; \quad Cr_i^0 = 0,9 \\ i &\in \{1, Np\}; \quad j \in \{1, D\} \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 Mutacija

Osnovni algoritem DE ima več načinov mutacije. V našem algoritmu smo uporabili $/rand/1$, ki je eno od najbolj uporabljenih načinov mutacije. Ta mutacija izbere tri naključne med seboj različne posameznike iz populacije, ki so različni tudi od i -tega posameznika. Nato enemu od izbranih posameznikov doda razliko med drugima dvema posameznikoma. Razlika se dodatno skalira s pomočjo krmilnega parametra mutacije. Ta parameter je v osnovnem algoritmu konstanten. V primeru našega samoprilagodljivega mehanizma pa se izračuna s pomočjo naključnega generatorja števil po Gaussovi porazdelitvi ($rand_g$). Pri tej porazdelitvi se kot aritmetična sredina uporabi vrednost krmilnega parametra F_i^g , standardni odklon pa se določi s pomočjo vrednosti krmilnega parametra Np in kriterija za končanje evolucijskega procesa MAX_FEs . Nato se krmilni parameter mutacije še popravili tako, da se njegova vrednost nahaja znotraj intervala $[0, 1 - 0,99]$. Opisano mutacijo prikazuje enačba (2).

$$\begin{aligned} F_i^{g+1} &= rand_g(F_i^g, \frac{Np}{MAX_FEs}) \\ F_i^{g+1} &= \begin{cases} 0,99 & F_i^{g+1} > 0,99 \\ 0,1 & F_i^{g+1} < 0,1 \\ F_i^{g+1} & \text{drugače} \end{cases} \\ \vec{m}_i^g &= \vec{x}_{r_1}^g + F_i^{g+1} \cdot (\vec{x}_{r_2}^g - \vec{x}_{r_3}^g) \\ r_1, r_2, r_3 &\in \{1, Np\}, \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 Križanje

V našem algoritmu smo uporabili binarno križanje kot prikazuje enačba (3). Pri križanju se glede na krmilni parameter Cr in vrednosti uniformnega naključnega generatorja oblikuje križan vektor. Križanje vsebuje še dodatni pogoj, ki zagotavlja, da bo vsaj en element mutiranega vektorja postal element križanega vektorja. V osnovnem algoritmu DE je krmilni parameter konstanten. V našem primeru pa se izračuna s pomočjo naključnega generatorja števil po Gaussovi porazdelitvi ($rand_g$). Pri tej porazdelitvi se kot aritmetična sredina uporabi vrednost krmilnega parametra Cr_i^g , standardni

odklon pa se nastavi na vrednost 0,5. Podobno kot pri mutaciji, se tudi tukaj krmilni parameter križanja popravi tako, da se njegova vrednost nahaja znotraj intervala $[0, 1 - 0,99]$.

$$\begin{aligned} Cr_i^{g+1} &= rand_g(Cr_i^g, 0,5) \\ Cr_i^{g+1} &= \begin{cases} 0,99 & Cr_i^{g+1} > 0,99 \\ 0,1 & Cr_i^{g+1} < 0,1 \\ Cr_i^{g+1} & \text{drugače} \end{cases} \\ k_{i,j}^g &= \begin{cases} m_{i,j}^g & (rand_{i,j}[0,1] < Cr_i^{g+1}) \vee (rand_j = j) \\ x_{i,j}^g & \text{drugače} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 Popravljanje

Elementi križanega vektorja so lahko izven iskalnih intervalov. Zato se te vrednosti popravijo. To lahko storimo na dva načina. Prvi je ta, da se vrednosti, ki so izven intervala postavijo na vrednost bližje meje intervala. Drugi način pa je ta, ki smo ga tudi mi uporabili. Vrednosti izven intervala se prezrcalijo nazaj v interval, kot prikazuje enačba (4).

$$t_{i,j}^g = \begin{cases} x_{min,j} + (x_{min,j}^g - k_{i,j}^g) & k_{i,j}^g < x_{min,j} \\ x_{max,j} - (k_{i,j}^g - x_{max,j}^g) & k_{i,j}^g > x_{max,j} \\ k_{i,j}^g & \text{drugače} \end{cases} \quad (4)$$

2.5 Selekcija

Selekcija primerja dva posameznika in določa, kateri bo preživel v naslednjo generacijo ($g + 1$). Način delovanja selekcije, ko iščemo minimum, prikazuje enačba (5). Za razliko od osnovnega algoritma diferencialne evolucije, v našem primeru selekcija izbira tudi vrednosti krmilnih parametrov F_i in Cr_i .

$$\begin{aligned} \{\vec{x}_i^{g+1}, F_i^{g+1}, Cr_i^{g+1}\} &= \\ \begin{cases} \{\vec{x}_i^g, F_i^g, Cr_i^g\} & f(\vec{x}_i^g) < f(\vec{t}_i^g) \\ \{\vec{t}_i^g, F_i^g, Cr_i^g\} & \text{drugače} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

3 Eksperimentalni rezultati

Učinkovitost načrtovanega samoprilagodljivega mehanizma smo preizkusili s pomočjo funkcij F1-F6 iz posebne sekcije mednarodnega simpozija evolucijskega računanja (CEC 2008 Special Session and Competition on High-Dimension Real-Parameter Optimization). Te funkcije smo najprej reševali brez uporabe načrtovanega mehanizma. Krmilna parametra F in Cr sta bila fiksna in njuni vrednosti sta bili 0,5 in 0,9. Vrednost krmilnega parametra Np je bila 100. Za vsako funkcijo smo algoritem zagnali 25 krat. Dobljene rezultate prikazujejo tabele 1, 3 in 5 za dimenzije problemov 100, 500 in 1000. V tabelah so prikazane napake oz. razlike med funkcijsko vrednostjo najboljšega posameznika in optimumom. Rezultate vseh zagonov smo uredili in v tabelah prikazali rezultate najboljšega, sedmega, trinajstega, devetnajstega in najslabšega zagona. Zadnji

Tabela 1: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE (D=100).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
5,00e+5	1 (najboljši)	5,684342e-14	3,711873e+01	8,154971e+01	1,377817e+02	2,842171e-14	3,350920e-11
	7	1,136868e-13	4,545722e+01	9,408607e+01	2,698616e+02	2,842171e-14	4,715162e-11
	13 (srednji)	1,136868e-13	4,990484e+01	1,595903e+02	4,446011e+02	5,684342e-14	6,215828e-11
	19	1,136868e-13	5,317940e+01	1,895804e+02	5,563876e+02	5,684342e-14	1,083151e-10
	25 (najslabši)	1,136868e-13	5,905788e+01	2,918707e+02	7,023530e+02	6,344523e-02	9,562231e-01
	povprečje	1,023181e-13	4,921121e+01	1,578348e+02	4,227662e+02	4,016722e-03	3,824892e-02
	std. dev.	2,273735e-14	5,831405e+00	5,690631e+01	1,614451e+02	1,261800e-02	1,873807e-01

Tabela 2: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE, ki vsebuje samoprilagodljivi mehanizem krmilnih parametrov (D=100).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
5,00e+5	1 (najboljši)	5,684342e-14	6,359228e+00	8,541414e+01	2,423277e+02	2,842171e-14	9,650876e-10
	7	5,684342e-14	8,905902e+00	8,621564e+01	2,730154e+02	2,842171e-14	1,272440e-09
	13 (srednji)	5,684342e-14	1,088728e+01	8,673205e+01	3,235792e+02	2,842171e-14	1,555151e-09
	19	5,684342e-14	1,323043e+01	9,265445e+01	3,532021e+02	2,842171e-14	1,922928e-09
	25 (najslabši)	1,136868e-13	1,730629e+01	1,491591e+02	5,030840e+02	5,684342e-14	3,676860e-09
	povprečje	5,911716e-14	1,130087e+01	1,014834e+02	3,332892e+02	3,069545e-14	1,741561e-09
	std. dev.	1,113898e-14	3,067745e+00	2,595148e+01	7,588596e+01	7,710617e-15	6,857131e-10

dve vrstici prikazujeta še povprečje napak zagonov in njihovo standardno deviacijo. Nato smo na enak način uporabili algoritem z uporabo samoprilagodljivega mehanizma. Vrednost krmilnega parametra Np je bila 100. Rezultate tega algoritma prikazujejo tabele 2, 4 in 6 za dimenzije problemov 100, 500 in 1000. Na osnovi pridobljenih rezultatov vidimo, da je vpeljan mehanizem v povprečju zagonov za vse funkcije dosegel boljše rezultate. Zato lahko ugotovimo, da vpeljan mehanizem zmanjša število krmilnih parametrov, ki jih mora nastaviti uporabnik in je izboljšal učinkovitost algoritma na izbranih testnih funkcijah glede na osnovni algoritem DE.

4 Zaključek

V članku smo predstavili samoprilagodljiv mehanizem, ki smo ga aplicirali na algoritem DE. V ta mehanizem smo vključili krmilna parametra F in Cr . Tako skozi evolucijski proces izbira operacija selekcije dobre vrednosti parametrov, kis jih spreminjamo s pomočjo naključnega generatorja števil po Gaussovi porazdelitvi. Mehanizem smo preizkusili s pomočjo testnih funkcij CEC 2008. Na osnovi dobljenih rezultatov smo ugotovili, da je na izbranih testnih funkcijah mehanizem izboljšal učinkovitost algoritma diferencialne evolucije.

Kot možnost za nadaljnje raziskave vidimo možnost uporabe naključnih generatorjev števil z drugačnimi porazdelitvami. Zanimivo bi bilo raziskati tudi interval spreminjanja krmilnih parametrov. Tukaj mislimo predvsem na krmilni parameter F , ki z malimi vrednostmi omogoča hitro konvergenco. Zaradi te konvergenca pa lahko algoritem obični tudi v lokalnem optimumu.

Literatura

- [1] J. Brest. Differential Evolution with Self-Adaptation. Uredniki: Juan Ramón Rabuñal Dopico, Julian Dorado in Alejandro Pazos, *V Encyclopedia of Artificial Intelligence*, str. 488–493. Information Science Reference: IGI Global, 2009.
- [2] J. Brest in M. Sepesy Maučec. Self-adaptive Differential Evolution Algorithm using Population Size Reduction and Three Strategies. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, Sprejeto.
- [3] J. Brest, A. Zamuda, I. Fister in M. Sepesy Maučec. Large Scale Global Optimization using Self-adaptive Differential Evolution Algorithm. In *IEEE World Congress on Computational Intelligence 2010, July 18 - 23, Barcelona, Spain*, str. 3097–3104, 2010.
- [4] J. Brest, Sašo Greiner, Borko Bošković, Marjan Mernik in Viljem Žumer. Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 10(6):646–657, 2006.
- [5] R. Storn in K. Price. Differential Evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report TR-95-012, Berkeley, CA, 1995.
- [6] R. Storn in K. Price. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimisation Over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11:341–359, 1997.
- [7] J. Teo. Exploring dynamic self-adaptive populations in differential evolution. *Soft Comput.*, 10:673–686, May 2006.
- [8] A. Zamuda, J. Brest, B. Bošković in V. Žumer. Differential Evolution with Self-adaptation and Local Search for Constrained Multiobjective Optimization. V *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) 2009*, str. 195–202. IEEE Press, 2009.

Tabela 3: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE (D=500).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
2,50e+6	1 (najboljši)	3,466556e-08	1,002003e+02	1,108130e+03	1,171064e+03	9,848492e-09	4,631717e+00
	7	1,274365e-07	1,020210e+02	1,405099e+03	1,328267e+03	3,228522e-07	5,966396e+00
	13 (srednji)	5,223772e-07	1,074114e+02	1,483354e+03	1,390948e+03	2,214303e-02	7,407792e+00
	19	2,327171e-06	1,101295e+02	1,746818e+03	1,529247e+03	6,819854e-02	8,116866e+00
	25 (najslabši)	1,261601e-03	1,185489e+02	2,067511e+03	1,660580e+03	2,464812e+00	1,035440e+01
	povprečje	5,332729e-05	1,067096e+02	1,537076e+03	1,429050e+03	2,109598e-01	7,194519e+00
	std. dev.	2,467662e-04	5,003198e+00	2,391886e+02	1,290460e+02	5,055616e-01	1,387502e+00

Tabela 4: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE, ki vsebuje samoprilagodljivi mehanizem krmilnih parametrov (D=500).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
2,50e+6	1 (najboljši)	3,979039e-13	8,157461e+01	8,094634e+02	5,530864e+02	1,989520e-13	9,852222e-01
	7	5,115908e-13	8,374712e+01	9,180745e+02	6,780381e+02	2,273737e-13	1,143021e+00
	13 (srednji)	5,684342e-13	8,714516e+01	9,915337e+02	8,903763e+02	2,842171e-13	1,236545e+00
	19	6,252776e-13	8,877887e+01	1,040775e+03	1,007638e+03	5,115908e-13	1,302055e+00
	25 (najslabši)	3,012701e-12	9,417307e+01	1,193551e+03	1,164575e+03	7,511469e-01	1,771532e+00
	povprečje	6,775736e-13	8,673560e+01	9,836807e+02	8,548290e+02	4,091289e-02	1,257520e+00
	std. dev.	4,902842e-13	3,180641e+00	8,906810e+01	1,792384e+02	1,508930e-01	1,686979e-01

Tabela 5: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE (D=1000).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
5,00e+6	1 (najboljši)	6,188067e-02	1,136799e+02	8,291190e+03	4,699172e+03	9,298543e-03	1,429698e+01
	7	2,975655e-01	1,196170e+02	1,616934e+04	4,935020e+03	5,622081e-02	1,493381e+01
	13 (srednji)	5,271812e-01	1,212309e+02	2,174801e+04	5,038449e+03	3,050370e-01	1,547195e+01
	19	1,625701e+00	1,257872e+02	3,041871e+04	5,150879e+03	6,153056e-01	1,560088e+01
	25 (najslabši)	8,938964e+00	1,329980e+02	1,707038e+06	5,524977e+03	1,678517e+00	1,618219e+01
	povprečje	1,271802e+00	1,222859e+02	9,286544e+04	5,054509e+03	4,212066e-01	1,531498e+01
	std. dev.	1,845149e+00	4,787281e+00	3,298305e+05	1,795226e+02	4,430289e-01	5,094989e-01

Tabela 6: Napake pri testnih funkcijah za algoritem DE, ki vsebuje samoprilagodljivi mehanizem krmilnih parametrov (D=1000).

FES		F1	F2	F3	F4	F5	F6
5,00e+6	1 (najboljši)	2,273737e-12	9,881501e+01	2,110139e+03	1,858156e+03	1,364242e-12	3,170081e+00
	7	5,002221e-12	1,039608e+02	2,272996e+03	2,034687e+03	5,371703e-12	3,737953e+00
	13 (srednji)	7,673862e-12	1,055512e+02	2,360617e+03	2,141147e+03	1,232099e-02	4,364410e+00
	19	1,352873e-11	1,076368e+02	2,454860e+03	2,344118e+03	9,922639e-02	4,690932e+00
	25 (najslabši)	1,919034e-10	1,090300e+02	2,740345e+03	2,479431e+03	9,913946e-01	5,646657e+00
	povprečje	1,644366e-11	1,051060e+02	2,387306e+03	2,161004e+03	1,646608e-01	4,373355e+00
	std. dev.	3,617325e-11	2,808712e+00	1,609899e+02	1,900150e+02	2,863517e-01	6,439739e-01