

SIGNATURE PSO: MODIFIED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION DENGAN FUZZY SIGNATURE DAN IMPLEMENTASI PADA OPTIMALISASI KENDALI LQR

Novendra Setyawan^{1*)}, Ermanu Azizul Hakim²⁾, Zulfatman³⁾

^{1), 2), 3)} Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Malang

Jl Tlogomas No 246 Malang

*Email : novendra@umm.ac.id

Received: September 10, 2019. Accepted: December 18, 2019

ABSTRAK

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan algoritma optimasi yang sederhana dan handal untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi. Pada metode tersebut persebaran partikel melalui pencarian global dan pencarian lokal merupakan kunci keberhasilan dalam pencarian dengan algoritma PSO melalui parameter inerti. Pada makalah ini memaparkan metode perubahan bobot inerti pada PSO dengan menggunakan *fuzzy signature*. Pada makalah ini usulan metode digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi parameter kendali LQR pada stabilisasi *double inverted pendulum*. Evaluasi performansi dilakukan dengan algoritma perubahan bobot lain. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat menurunkan *Integral Time Absolute Error (ITAE)* 7% dibanding dengan algoritma lain. *Signature PSO* memiliki *robustness* dan optimal dalam menyelesaikan permasalahan tersebut.

Kata kunci: Particle Swarm Optimization, Inerti, LQR, Fuzzy Signature, Inverted Pendulum

ABSTRACT

Particle Swarm Optimization (PSO) is an optimization that is simple and reliable to complete optimization. In this method, the distribution of particles through global search and local search is the key obtained through searching with PSO through the inertia parameter. This paper describes the method of changing the weights on PSO using fuzzy signatures. In this paper, the method used to solve the problem of optimizing the LQR control parameters on the stabilization of a double inverted pendulum. Performance evaluation is done by another weight change algorithm. Integral Time Absolute Error (ITAE) 7% compared to other algorithms. PSO signatures have resilience and are optimal in fulfilling these interests.

Keyword: Particle Swarm Optimization, Inerti, LQR, Fuzzy Signature, Inverted Pendulum

PENDAHULUAN

Terinspirasi oleh fenomena alam, *Particle Swarm Optimization (PSO)* telah banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi. PSO diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart [1] pada 1995 yang termotivasi oleh perilaku sosial dari individu seperti sekelompok burung dan gerombolan ikan. Pada penyelesaian masalah

optimisasi, potensi solusi berkembang di ruang pencarian melalui beberapa iterasi. Kelebihan dari algoritma PSO adalah kesederhanaan dan beberapa parameter untuk ditetapkan.

Algoritma dimulai dengan inisialisasi acak populasi solusi potensial yang juga disebut partikel. Populasi partikel juga dikenal sebagai segerombolan (*swarm*), yang bergerak melalui ruang pencarian

dengan dimensi-D. Posisi suatu partikel diubah dengan beberapa lintasan dengan kecepatan tertentu berdasarkan pengalaman partikelnya dan kelompok.

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD}] \text{ dan } v_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD}] \quad (1)$$

dimana $x_{id} \in [lb, ub]$ adalah posisi partikel, v_i adalah kecepatan dari partikel, $d \in D$, dan lb dan ub adalah batas bawah dan batas atas pencarian

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 \times rand_1 \times (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 \times rand_2 \times (g_d(t) - x_{id}(t)) \quad (2)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1)$$

dimana c_1 dan c_2 adalah konstanta akselerasi, $rand_1$ dan $rand_2$ adalah random number pada $[0,1]$, p_{id} adalah *personal best* yaitu pengalaman individu partikel and g_d adalah *global best* yaitu pengalaman kelompok partikel.

Keseimbangan dan pencarian lokal dan global pada algoritma optimasi melalui pembelajaran setiap iterasi merupakan hal penting. Hampir setiap

$$v_{id}(t+1) = w \times v_{id}(t) + c_1 \times rand_1 \times (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 \times rand_2 \times (g_d(t) - x_{id}(t)) \quad (3)$$

Pada mulanya w merupakan parameter dengan nilai konstan, akan tetapi peningkatan performa pencarian PSO kurang optimal. Seiring perkembangannya terdapat mekanisme untuk merubah parameter *inertia* tersebut bergantung pada perubahan kondisi yang terjadi pada pembelajaran *swarm*. Mekanisme perubahan bobot tersebut bertujuan untuk mengatur persebaran dan kemampuan pencarian algoritma PSO. Pada [4] mengusulkan perubahan bobot inersia dengan fungsi *linear decreasing*. Pencapaian dalam menjaga persebaran dan pencarian yang lebih baik didapatkan dengan mengubah bobot tersebut dengan adaptif dilakukan oleh [5].

Pada beberapa perubahan bobot yang dilakukan [6] dan [7] menggunakan satu buah *variable* untuk mengukur kondisi dalam *swarm* yang digunakan untuk mengubah bobot inersia, seperti *success count*, *diversity* atau persebaran partikel, dan iterasi. Pada [7] tidak cukup menggunakan satu buah *variable* untuk menggambarkan kondisi *swarm* pada PSO digabungkan dengan logika fuzzy untuk mengubah bobot *inertia*. Namun hal tersebut membuat algoritma menjadi lebih rumit.

Representasi posisi dan kecepatan masing-masing partikel dijelaskan pada

dengan dimensi-D. Kemudian pada PSO posisi partikel berpindah dengan kecepatan sesuai dengan mekanisme pada

algoritma optimasi memiliki sebuah mekanisme untuk mencapai tujuan tersebut, seperti mutasi dan pindah silang pada *Genetic Algorithm* (GA) [2], kemudian parameter temperatur pada algoritma *Simulated Annealing* (SA). Berdasarkan hal tersebut pada [3] mekanisme perubahan kecepatan partikel ditambahkan sebuah parameter yang disebut *inertia* (w) sehingga persamaan perubahan kecepatan partikel seperti persamaan

Pada [8] mengusulkan sebuah capaian baru yaitu *fuzzy signature* untuk membuat algoritma fuzzy menjadi lebih sederhana yaitu dengan membuat invaransi pada fuzzy menjadi satu persamaan agregasi. Pada makalah ini memberikan capaian baru dengan menggunakan *fuzzy signature* sebagai metode perubahan bobot *inertia* pada PSO. Pengujian dilakukan dengan mengimplementasikan pada kendali LQR pada *Double Inverted Pendulum*.

METODE PENELITIAN

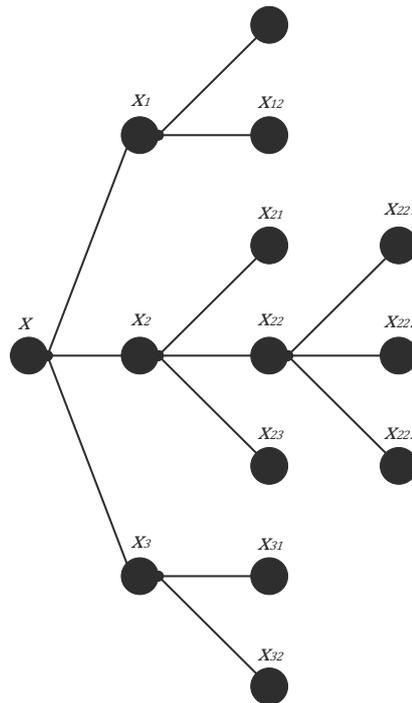
1. Fuzzy Signature [8]

Fuzzy signature merupakan pengembangan logika *fuzzy* yang multi dimensi, namun memiliki algoritma yang sederhana. Pada beberapa dimensi *variable* input pada *fuzzy signature* saling berhubungan karena memiliki sub-group. Sebagai contoh struktur dari *fuzzy signature* dapat digambarkan pada Gambar 1 atau dapat dijabarkan dalam vektor pada persamaan (4).

$$x = \begin{bmatrix} [x_{11} \\ x_{12}] \\ x_{21} \\ [x_{221} \\ x_{222} \\ x_{223}] \\ x_{23} \\ [x_{31} \\ x_{32}] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Disini $[x_{11} \ x_{12}]$ merupakan sub-group dari tingkat tertinggi yaitu x_1 . Pada $[x_{221} \ x_{222} \ x_{223}]$

akan terkombinasi menjadi satu bentuk yaitu x_{22} . Pada cabang cabang tersebut terkombinasi menjadi satu sehingga $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]$. Kombinasi pada cabang cabang dilakukan dengan suatu fungsi agregasi yang sesuai dengan tujuan akhir pada level tertinggi. Sebagai contoh a_1 adalah fungsi agregasi yang menghasilkan x_1 sehingga $x_1 = x_{11}a_1x_{12}$. Pada cabang cabang tersebut fungsi agregasi bisa jadi identik atau sangat berbeda bergantung pada tujuan dari level tertinggi.



Gambar 1. Contoh struktur dari fuzzy signature

2. PSO Signature

PSO memiliki sebuah bobot berfungsi untuk mengatur pencarian global maupun pencarian lokal. Selain bobot tersebut konstan, seiring perkembangannya terdapat beberapa capaian yang mengubah bobot tersebut secara adaptif sesuai kondisi *swarm* di PSO. Pada [6] mengubah bobot secara adaptif dengan memperkenalkan sebuah *variable percentage success* yaitu berapa presentase populasi yang memperbarui *personal best*, dimana parameter tersebut dijabarkan pada persamaan(6) dimana

$$SC_i = \begin{cases} 1, & f(x_i) < P_{id} \\ 0, & else \end{cases} \quad (5)$$

sehingga

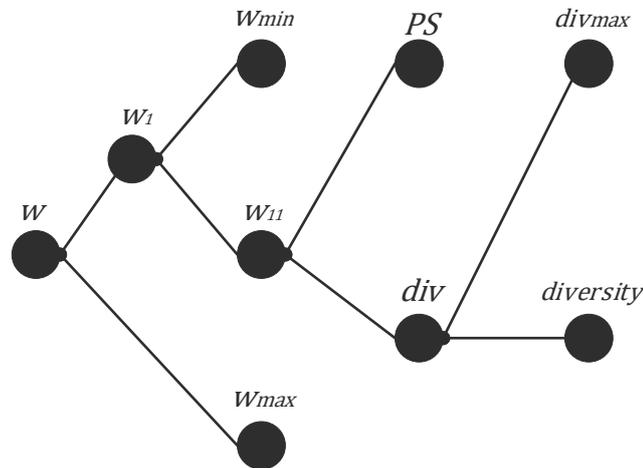
$$PS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SC_i \quad (6)$$

Selain parameter *PS* pada [7] memperkenalkan cara perhitungan *diversity* atau tingkat persentase persebaran dari partikel pada PSO. Parameter tersebut digunakan bersama dengan iterasi dengan logika *fuzzy* untuk mengubah parameter pada PSO secara adaptif. Parameter *diversity* dapat dihitung dengan pendekatan pada persamaan

$$diversity = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{d=1}^D (x_{id} - g_d)^2} \quad (7)$$

signature sebagai mekanisme perubahan bobot inerti secara adaptif. Pada makalah ini struktur fuzzy signature digambarkan pada Gambar 2.

Pada makalah ini beberapa parameter tersebut dikombinasikan dengan menggunakan metode fuzzy



Gambar 2. Struktur perubahan bobot PSO Signature

Pada struktur tersebut jika ditulis didalam vektor menjadi seperti persamaan (8).

$$w = \left[\left[\left[\begin{matrix} W_{max} \\ W_{min} \\ PS \\ \text{diversity} \\ \text{div}_{max} \end{matrix} \right] \right] \right] \quad (8)$$

$$w = \left[\left[\left[\begin{matrix} 1 \\ 0, 2 \\ 0, 4 \\ 0, 5 \end{matrix} \right] \right] \right] \rightarrow \left[\begin{matrix} 1 \\ 0, 2 \\ 0, 45 \end{matrix} \right] \quad (10)$$

Dari agregasi level tertinggi menghasilkan

$$w = \left[\left[\begin{matrix} 1 \\ 0, 2 \\ 0, 45 \end{matrix} \right] \right] \rightarrow \left[\begin{matrix} 1 \\ 0, 45 \end{matrix} \right] = 0, 45 \quad (11)$$

Pada struktur tersebut menggunakan 3 jenis fungsi agregasi, yaitu min, max, dan mean. Pada bobot w yang merupakan level tertinggi dari struktur tersebut diharuskan berubah sesuai dengan kondisi PS dan $diversity$, serta sesuai batasan div_{max} , w_{min} , dan w_{max} . Dalam metode ini penggunaan fungsi agregasi yang tepat perlu dilakukan, sebagai contoh penggunaan fungsi agregasi tersebut adalah sebagai berikut. Mula-mula kondisi ditunjukkan pada persamaan (9).

$$w = \left[\left[\left[\begin{matrix} 1 \\ 0, 2 \\ 0, 4 \\ 0, 5 \\ 1 \end{matrix} \right] \right] \right] \quad (9)$$

Agregasi pertama merupakan agregasi antara $diversity$ dengan div_{max} , yang menghasilkan persamaan (10)

Sehingga bobot w dari kondisi yang dijabarkan (9) adalah 0,45.

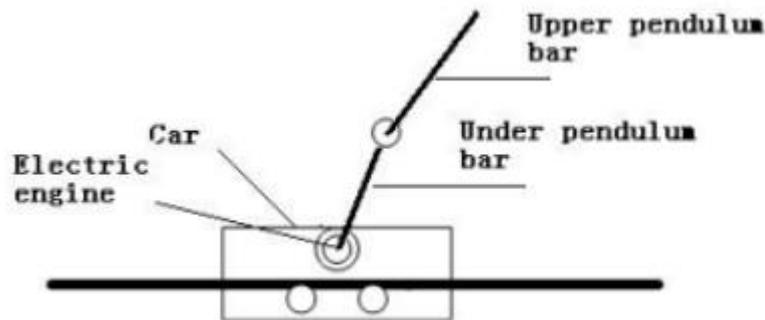
3. Double Inverted Pendulum

Sistem pendulum-kereta adalah salah satu dari plant nonlinear yang memiliki karakteristik yang sederhana, namun sulit untuk dikendalikan [9]. Bagian utama dari sistem pendulum kereta adalah kereta yang dapat bergerak horizontal pada lintasan. yang terbatas dan pendulum yang dapat berayun bebas terhadap porosnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Double Inverted Pendulum* biasa digunakan untuk menguji suatu metode kendali sehingga metode kendali tersebut dapat diterapkan pada berbagai aplikasi dari sistem nonlinear yang lebih kompleks. Terdapat tiga permasalahan kendali pada *Double Inverted Pendulum*, yaitu *swing-up*, stabilisasi, dan *tracking*. *Swing-up* adalah

usaha yang dilakukan untuk mengayunkan batang pendulum dari posisi menggantung ke posisi terbaliknya. Stabilisasi adalah usaha yang dilakukan untuk menjaga batang pendulum tetap stabil pada posisi terbaliknya. *Tracking* adalah usaha yang dilakukan untuk memaksa agar bergerak mengikuti sinyal referensi dengan tetap mempertahankan batang pendulum pada posisi terbaliknya. Suatu sistem nonlinear seperti *Double Inverted Pendulum*, apabila tidak dikendalikan akan mempengaruhi kestabilan sistem. Oleh karena itu digunakan suatu metode kendali yang bersifat *robust* untuk menjaga kestabilan sistem.

Pada [10], telah dilakukan perbandingan dengan menggunakan metode LQR dan *pole placement* untuk penyelesaian permasalahan kestabilan pada *Double Inverted Pendulum*. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah penggunaan LQR memiliki hasil lebih baik dibandingkan

menggunakan pole placement. Namun pada [11] juga dikatakan, jika penambahan metode optimisasi *heuristic* dapat memperbaiki hasil respon sistem. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan penggunaan metode heuristic untuk perbaikan respon sistem pada sistem *Double Inverted Pendulum* sangat diperlukan. Pada [10], telah dilakukan penelitian pada *Double Inverted Pendulum* menggunakan optimal control yaitu kendali LQR. Hasil yang didapatkan adalah, kendali LQR mampu memperbaiki step response pada sistem. Kelemahan penelitian ini adalah penentuan konstanta matriks Q dan R dilakukan secara trial dan error. Seperti pada [11], penentuan secara trial dan error dapat diperbaiki dengan penambahan metode heuristic. Sehingga pada penelitian ini, PSO *signature* digunakan untuk metode *tunning* parameter kendali LQR.



Gambar 3. Model fisik double *Double Inverted Pendulum*

Pada [12] *Double Inverted Pendulum* dengan panjang kedua lengan pendulum 1 meter, masa lengan pendulum 0.75 kg, serta masa kereta

pendulum 2 kg, model persamaan *state space* dapat dijabarkan pada persamaan (12)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.11 & 0.77 \\ 0 & 36.20 & -15.70 \\ 0 & -29.08 & 24.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.45 \\ -0.56 \\ 0.11 \end{bmatrix} \quad (12)$$

dimana x_1 adalah posisi kereta dari kondisi awal dalam meter, x_2 adalah sudut *lower pendulum* terhadap garis vertikal dalam radian, x_3 adalah sudut *upper pendulum* terhadap garis vertikal dalam radian, x_4 adalah kecepatan kereta, x_5 adalah kecepatan perubahan sudut *lower pendulum* dalam radian/s, dan x_6 adalah kecepatan perubahan sudut *upper pendulum* dalam radian/s.

4. Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator merupakan salah satu metode dalam perancangan sistem kendali optimal. Kelebihan penggunaan formulasi *Linear Quadratic* adalah pada kemudahan analisa dan pengimplementasiannya. Metode optimisasi dengan

LQR adalah dengan menentukan sinyal masukan yang akan memindahkan suatu *state* sistem linear dari kondisi (t_0) menuju ke suatu kondisi akhir (t) yang akan meminimumkan suatu indeks untuk kerja performansi kuadratik[11]. Pada permasalahan *Double Inverted Pendulum* yang merupakan permasalahan *regulator*, mempunyai indeks performansi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (13).

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) \quad (13)$$

dimana untuk menyelesaikan permasalahan indeks performansi diatas diselesaikan dengan menggunakan persamaan *Riccati*

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} \end{bmatrix} \quad \text{dan } R = r \quad (16)$$

5. Tuning Kendali LQR dengan PSO Signature

Pada optimasi kendali LQR dengan PSO Signature, parameter kendali LQR yaitu matriks Q dan R di-

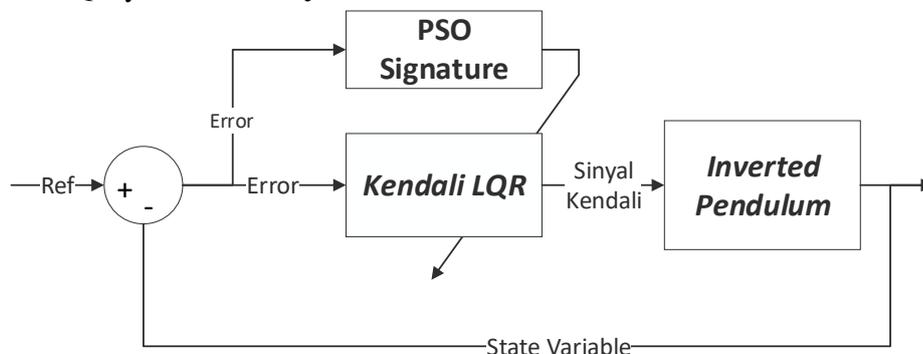
$$PA + A - PBR^{-1}P + Q = 0 \quad (14)$$

dimana solusi persamaan *Riccati* tersebut diselesaikan dengan persamaan

$$u = -R^{-1}B^T P x = -Kx \quad (15)$$

dimana u adalah sinyal kendali yang digunakan untuk mengendalikan *plant*, dimana apabila model memiliki 6 *state variable* dan 1 input seperti persamaan (12) maka memiliki pasangan matriks Q dan R adalah seperti persamaan (16).

tuning dengan algoritma PSO signature. Proses tuning pada kendali LQR dengan PSO Signature dapat digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram optimasi kendali LQR pada *Double Inverted Pendulum*

Pada optimasi kendali LQR tersebut dengan PSO, partikel diinisiasikan berupa parameter Q dan R yang kemudian diselesaikan solusinya dengan

$$x_{id} = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ x_{i4} \ x_{i5} \ x_{i6} \ x_{i7}] = [q_{11} \ q_{22} \ q_{33} \ q_{44} \ q_{55} \ q_{66} \ r] \quad (17)$$

Dengan fungsi tujuan seperti pada persamaan (18) yang merupakan *integral time absolute error* (ITAE).

persamaan *Riccati* pada persamaan (14). Partikel pada PSO tersebut dijabarkan pada persamaan (17).

$$f(x_{id}) = \int_0^{\infty} t|e(t)| \quad (18)$$

Sehingga secara umum berdasarkan tujuan tersebut maka optimasi kendali LQR dengan algoritma PSO Signature dapat dijabarkan pada pseudocode pada Gambar 5.

```

Start
Initialize particle  $x_{i,d}$  as eq(17);
For  $i=1$  to  $n$ 
 $P_i = x_i$  ;
End
While (termination condition is false)
 $SC=0$ ;
For  $i=1$  to number of particle
For  $d=1$  to  $n$ 
Update velocity of particle;
Update position of particle;
Evaluate particle with objective function (18);
End
End
Update  $P_{id}$  and  $G_d$ ;
Update Inertia parameter using fuzzy signature as (8);
End
 $(q_{11}, q_{22}, q_{33}, q_{44}, \text{ and } r) = G_d$  ;
End
    
```

Gambar 5. Pseudo code PSO Signature untuk optimasi LQR

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengujian dilakukan dengan membandingkan PSO signature dengan Adaptive Inertia Weight atau AIW PSO[6] yang merupakan pengembangan PSO yang optimal dalam menyelesaikan permasalahan

optimasi. Selain itu juga dibandingkan terhadap PSO dengan parameter inertia konstan atau standard PSO[3]. Pengujian dilakukan dengan parameter pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter sesuai dengan algoritma

Algorithm	w	c_1	c_2	Population	Iteration	No Run
Signature PSO	Adaptive dengan Fuzzy Signature	1.49	1.49	20	100	10
AIW PSO [6]	Adaptive	2	2	20	100	10
Standard PSO [3]	Konstan 0.75	1.49	1.49	20	100	10

Pada pengujian dilakukan selama sepuluh kali dimana pada satu kali run terdapat 100 kali iterasi untuk mencari parameter solusi. Pengujian dilakukan dengan kondisi plant yang sama. Pada

pengujian menggunakan komputer berprosesor i5 dan ram 4 Gb memiliki hasil pada

Tabel 2, dimana I adalah matriks identitas dengan ukuran 6×6 . Pada hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun nilai ITAE maksimum dari AIW PSO lebih kecil dibandingkan *Signature* PSO, tetapi dari sepuluh kali run nilai rata rata ITAE yang didapatkan *Signature* PSO lebih kecil 7 % jika dibandingkan PSO lainnya. Selain nilai rata

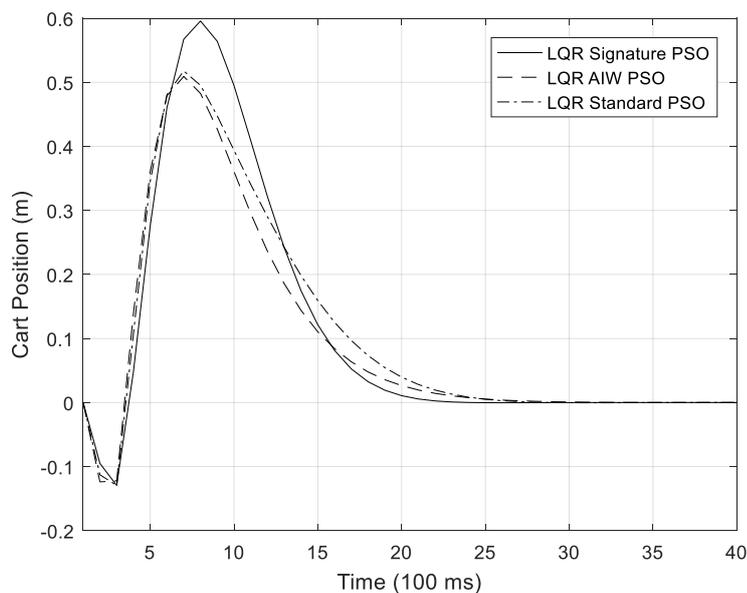
rata nilai minimum ITAE yang didapatkan *Signature* PSO juga lebih kecil meskipun tingkat signifikan dari perubahan tersebut hanya 0.01% akan tetapi dari segi ketahanan atau *robustness* pada algoritma *Signature* PSO lebih baik dibanding yang lain yang ditunjukkan dengan nilai standar deviasi yang lebih kecil 30%.

Tabel 2 Hasil pengujian algoritma selama sepuluh kali

		PSO Signature	PSO AIW	PSO Standard (Inertia Konstan)
Max	Sol	$Q = I \times \begin{bmatrix} 1000 \\ 1000 \\ 934.071 \\ 0.0001 \\ 132.776 \\ 159.530 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 1000 \\ 0.0001 \\ 1000 \\ 53.949 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 1000 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \\ 62.500 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$
	<i>Itae</i>	115.2376671288983	114.4096521684920	114.4795653046360
Mea n	Sol	$Q = I \times \begin{bmatrix} 473.333 \\ 993.209 \\ 122.818 \\ 14.2667 \\ 13.2777 \\ 168.139 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 737.192 \\ 800 \\ 329.367 \\ 35.005 \\ 0.03312 \\ 249.437 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 815.329 \\ 425.889 \\ 300 \\ 43.438 \\ 0.0001 \\ 521.733 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$
	<i>Itae</i>	112.4207734642174	113.2260563066121	113.6314747140301
Min	Sol	$Q = I \times \begin{bmatrix} 122.425 \\ 1000 \\ 0.0001 \\ 0.499 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 125.0103 \\ 1000 \\ 0.0001 \\ 0.5129 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$	$Q = I \times \begin{bmatrix} 121.931 \\ 1000 \\ 0.0001 \\ 0.497 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$ $R = 0.0001$
	<i>Itae</i>	111.1641977917066	111.1642385127179	114.4795653046360
Std		164.194098719274	249.8872660913316	258.1420283312436

Pada pengujian tersebut dilakukan dengan kondisi inisial sudut *upper pendulum* yaitu 0.08 radian dengan state yang lain 0, sehingga state pada *double inverted pendulum* yaitu $x = [0 \ 0 \ 0.08 \ 0 \ 0 \ 0]$. Pada hasil maksimum masing masing algoritma ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8. Pada

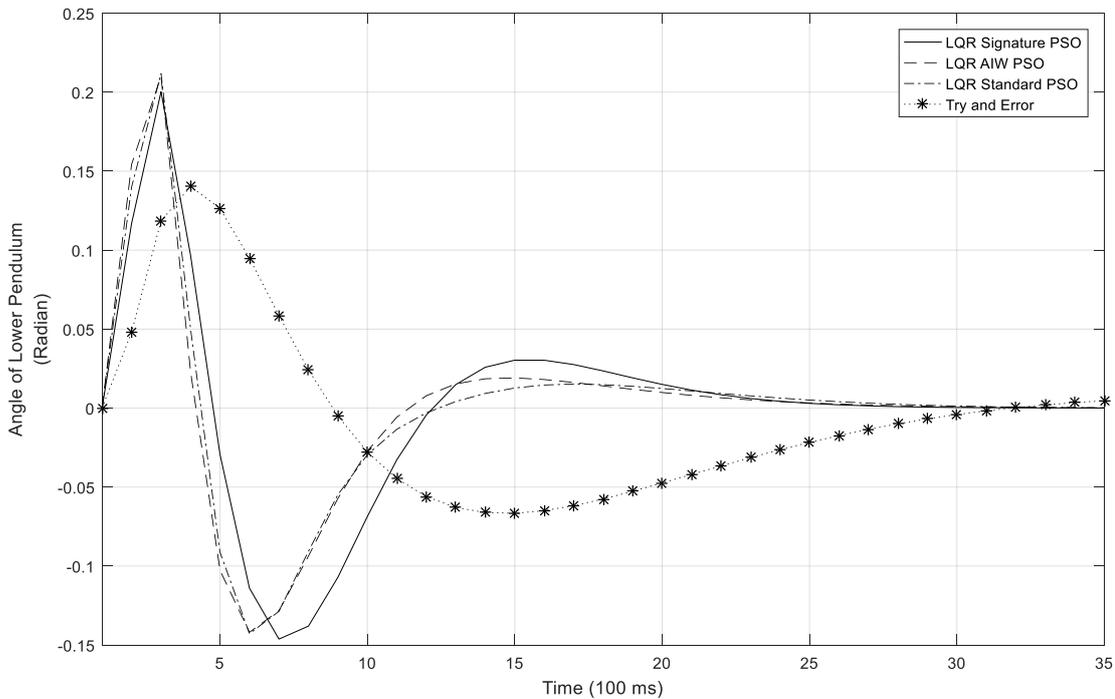
posisi kereta meskipun memiliki puncak yang lebih tinggi, namun dengan hasil yang didapatkan *Signature PSO* dapat mengembalikan pada kondisi normal dengan waktu yang lebih cepat yaitu pada detik ke 2.2 dimana 1 detik lebih cepat dibanding hasil optimasi algoritma lain seperti yang ditunjukkan Gambar 6.



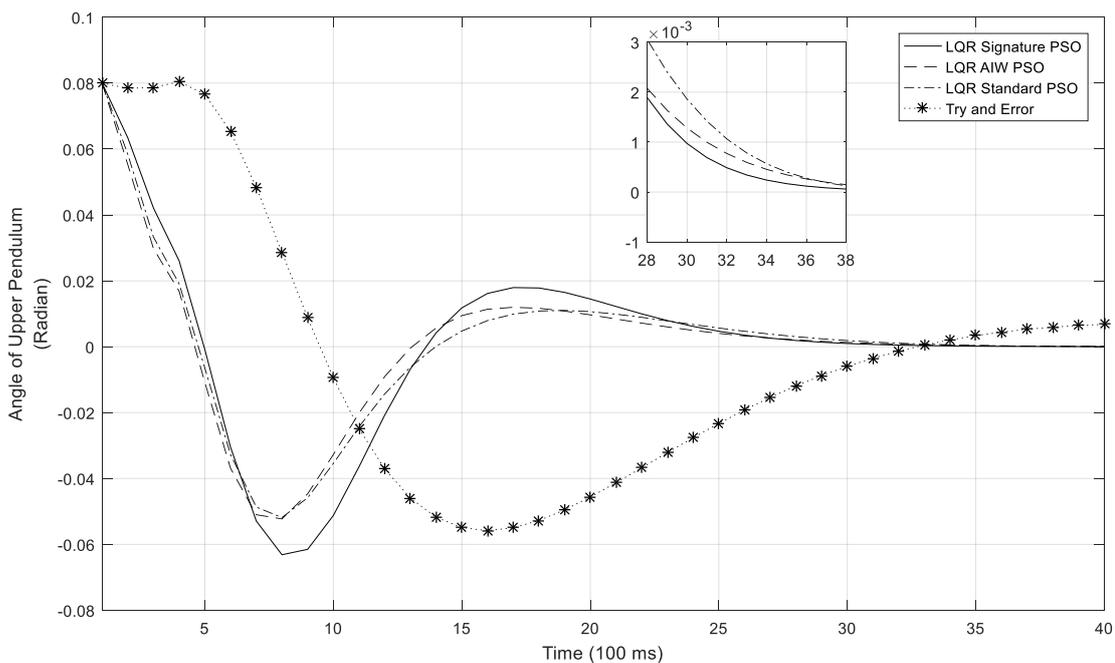
Gambar 6 Hasil perbandingan pada respon posisi kereta

Pada state sudut *lower* dan *upper* memiliki waktu penetapan yang lebih cepat dibanding hasil dari algoritma lain yang memiliki waktu penetapan 2.3 detik dengan waktu 300 mili detik lebih cepat dibanding yang lain, meskipun pada mulanya pada *lower* pendulum memiliki keterlambatan respon

namun pada akhirnya dapat menyesuaikan dengan cepat. Selain itu pada *upper* pendulum memiliki simpangan yang lebih besar namun dengan waktu penetapan yang lebih cepat hasil tersebut memiliki nilai ITAE **112.42** dengan 7 % lebih kecil dibanding hasil algoritma lain.



Gambar 7 Hasil perbandingan pada respon sudut lower pendulum



Gambar 8 Hasil perbandingan pada respon sudut upper pendulum

KESIMPULAN

Pada makalah ini telah diusulkan perubahan bobot inerti pada PSO dengan menggunakan *fuzzy signature*. Dengan *fuzzy signature* dapat menampung banyak parameter yang menggambarkan kondisi *swarm* pada PSO. Pada makalah ini diusulkan parameter berupa PS , diversity, div_{max} dan w_{min} . Dengan menggunakan *fuzzy signature* meski memiliki banyak parameter untuk perubahan bobot namun memiliki algoritma yang lebih sederhana dibanding *fuzzy* pada umumnya. Berdasarkan algoritma yang telah diusulkan dan pengujian yang telah dilakukan pada persoalan optimasi kendali LQR, *Signature PSO* memiliki performa yang lebih optimal dan *robust*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih dihaturkan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM) universitas Muhammadiyah Malang yang telah memberikan dukungan dan pendanaan pada penelitian ini. Terimakasih juga disampaikan kepada Tim Workshop Robotika UMM yang telah memberikan dukungan berupa sarana, prasarana, dan sumbangsih pemikiran terhadap penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] R. Eberhart and J. Kennedy, "New optimizer using particle swarm theory," *Proc. Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, pp. 39–43, 1995.
- [2] F. Yu and X. Xu, "A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 102–113, 2014.
- [3] R. . E. Y.H. Shi, "A Modified Particle Swarm Optimizer," *IEEE Int. Conf. Evol. Comput.*, vol. 49, no. 5, pp. 1144–1153, 1998.
- [4] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Empirical study of particle swarm optimization," *Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. CEC 1999*, vol. 3, pp. 1945–1950, 1999.
- [5] E. Engineering, I. Teknologi, and S. Nopember, "Adaptive Gaussian Parameter Particle Swarm Optimization And Its Implementation in Mobile Robot Path Planning," pp. 238–243, 2017.
- [6] A. Nickabadi, M. M. Ebadzadeh, and R. Safabakhsh, "A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 11, no. 4, pp. 3658–3670, 2011.
- [7] F. Olivas, F. Valdez, O. Castillo, and P. Melin, "Dynamic parameter adaptation in particle swarm optimization using interval type-2 fuzzy logic," *Soft Comput.*, vol. 20, no. 3, pp. 1057–1070, 2016.
- [8] Á. Ballagi and L. T. Kóczy, "Fuzzy signature based mobil robot motion control system," *SAMI 2008 6th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics - Proc.*, pp. 29–33, 2008.
- [9] M. N. Achmadiyah, "STABILISASI PADA DOUBLE INVERTED PENDULUM MENGGUNAKAN METODE," pp. 33–48.
- [10] T. Agustinah, T. Elektro, and F. T. Industri, "Stabilisasi Pada Sistem Pendulum-Kereta dengan Menggunakan Metode Fuzzy-Sliding Mode Control," vol. 3, no. 1, pp. 53–57, 2014.
- [11] E. Vinodh Kumar, G. S. Raaja, and J. Jerome, "Adaptive PSO for optimal LQR tracking control of 2 DoF laboratory helicopter," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 41, pp. 77–90, 2016.
- [12] P. S. Khatoon, "Optimal control of a double inverted pendulum by linearization technique," no. 1, pp. 1–5.