



The 5th Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)

Website Ciastech 2022 : <https://ciastech.widyagama.ac.id>

Open Conference Systems : <https://ocs.widyagama.ac.id>

Proceeding homepage : <http://publishing-widyagama.ac.id/ejournal-v2/index.php/ciastech/index>

P-ISSN : 2622-1276

E-ISSN : 2622-1284

PROTOTYPE SEMI-AUTOMATIC STEER BY WIRE MENGGUNAKAN SISTEM KONTROL OPTIMAL

Fachrudin Hunaini^{1*}, Dicky Dikananda Nafis²⁾, Purbo Suwandono³⁾, Gatot Subiyakto⁴⁾

^{1,2)} Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang

^{3,4)} Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang

INFORMASI ARTIKEL

Data Artikel :

Naskah masuk, 19 September 2022

Direvisi, 12 Oktober 2022

Diterima, 27 Oktober 2022

Email Korespondensi :

fachrudin_h@widyagama.ac.id

ABSTRAK

Tujuan pengembangan sistem kontrol optimal pada prototipe *Semi-automatic Steer by Wire* adalah Sinkronisasi sudut kemudi (*steer angle*) terhadap arah pergerakan roda kendaraan sehingga pergerakan kendaraan dapat dikendalikan pada lintasan yang diinginkan. *Semi-automatic* salah satu tipe *Steer by Wire system* yang masih menggunakan *steer input* untuk mengendalikan arah roda depan kendaraan. Sistem kontrol optimal yang digunakan adalah kombinasi *Fuzzy Logic Control (FLC)* dengan *Swarm based optimization*. Pengujian dilakukan dengan mengoptimisasi sistem kontrol sehingga diperoleh sistem kontrol optimal selanjutnya diterapkan pada prototipe *Semi-automatic Steer by Wire* dan diperoleh performansi prototipe yaitu C-RMS error sebesar 6,712. Prototipe *Semi-automatic Steer by Wire* dapat beroperasi pada rasio yang berbeda antara sudut kemudi terhadap sudut roda kendaraan yaitu rasio 1 : 25 untuk kecepatan di atas 10 km/h atau saat kendaraan melaju dengan kecepatan sedang hingga tinggi dan rasio 1 : 6,25 untuk kecepatan di bawah 10 km/h atau saat kendaraan sedang manuver di area parkir.

Kata Kunci : *Semi-automatic, Steer by Wire, FLC, Optimisasi*

1. PENDAHULUAN

Sistem *Steer by Wire (SbW)* adalah teknologi sistem kemudi kendaraan yang tidak menggunakan hubungan mekanis antara *steer* terhadap roda depan kendaraan dan digantikan oleh penggerak elektrik [1], [2]. *Semi-automatic SbW* adalah bagian dari sistem *SbW* yang masih menggunakan *steer* untuk menentukan arah roda depan kendaraan [3], [4] sehingga dan memiliki kelebihan yaitu rasio antara sudut *steer* terhadap sudut roda depan kendaraan dapat diatur secara variable sebagai fungsi dari kecepatan dan penempatannya mudah untuk disesuaikan.

Upaya untuk peningkatan kinerja suatu sistem diperlukan sistem kontrol dengan tujuan untuk menghasilkan aksi kontrol yang cepat dengan *error* yang kecil. Sistem kontrol menggunakan *Fuzzy*

Logic, merupakan metode sistem kontrol yang handal untuk mengendalikan sistem yang nonlinier [5], [6] tetapi untuk mendapatkan kinerja *Fuzzy Logic Control* (FLC) yang optimal diperlukan metode untuk optimisasi parameter input dan output FLC.

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan metode optimisasi berbasis perilaku yang lebih sederhana dan cepat mencapai konvergensi [7], [8], dengan menirukan perilaku sosial makhluk hidup, seperti sekawanan burung atau ikan yang bergerak sesuai dengan tujuan tertentu. *Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO) merupakan inovasi algoritma PSO untuk lebih menjamin tercapainya *global optimal* dengan menyebar partikel sebagai fungsi posisi berdasarkan mekanika kuantum [9]. Selanjutnya metode QPSO mengalami modifikasi pada parameter *local attractor* untuk lebih menjamin tercapainya *global convergence* yang lebih cepat dan akurat dan metode ini disebut *Modified-Quantum Particle Swarm Optimization* (MQPSO) [10], [11].

Pada paper ini dikembangkan prototipe Semi-automatic SbW dengan strategi sistem kontrol menggunakan FLC yang dioptimisasi menggunakan *Swarm base optimization* sehingga arah pergerakan roda depan kendaraan dapat dikendalikan secara optimal sesuai dengan lintasan yang diinginkan. Pengujian sistem kontrol dilakukan dengan menggunakan software untuk mendapatkan sistem kontrol yang optimal selanjutnya diterapkan secara *real time simulation* menggunakan *hardware* [10], [12] dalam bentuk prototipe *SbW Rig* yang terdiri dari *inner loop control* [13] berupa *actuator* sebagai penggerak *rack-pinion* dan *rotary encoder* sebagai sensor posisi perubahan sudut roda serta *steer* dan *rotary encoder* sebagai input *SbW Rig*.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pemodelan Transfer Function

Pada penelitian ini plant yang digunakan adalah Motor Stepper dan rangkaian *rotary encoder* yang dinyatakan dalam *Transfer Function* yang diperoleh melalui proses identifikasi plant menggunakan Matlab [11]. Dengan mengambil data variable input dan output dari motor DC kemudian dilakukan *Estimate* pemodelan *transfer function* dalam bentuk polinomial 3-pole dan 3-zero menggunakan Toolbox Identification System pada Matlab maka diperoleh nilai *Fit to Estimation* (FTE) sebesar 97.84% dan *Transfer Function* dari Motor Stepper yang digunakan adalah:

$$F(s) = \frac{2.206s + 133.4}{s^2 + 17.77s + 132.8} \quad (1)$$

2.2. Sistem Kontrol

Perancangan sistem kontrol pada FLC merupakan proses mendesain parameter *Membership Function* (MF) sebagai variabel. Parameter MF dapat diubah berdasarkan pada nilai faktor pengali (Δ_{ER} , Δ_{DE} dan Δ_{OT}). Bentuk MF yang digunakan dalam penelitian ini adalah bentuk segitiga (*Triangular Function*) dan bentuk trapesium (*Trapezoidal Function*), setiap MF pada input kontrol (*error* dan *delta error*) serta output kontrol terdiri dari tiga MF. Setiap MF memiliki *language term* masing-masing yaitu: Negatif (N), Nol (Z), Positif (P) [14].

Perancangan sistem kontrol pada FLC dimulai dari inialisasi faktor pengali (Δ_{ER} , Δ_{DE} dan Δ_{OT}). Kemudian penentuan parameter *membership function* dengan menentukan nilai pada fungsi trapezoidal dan triangular untuk setiap faktor pengali. Referensi (sub set) *fuzzy* adalah berupa *membership function* yang didefinisikan sebagai [N, Z, P] untuk setiap variabel ER, DE, OT maka diperoleh hukum kontroler (*rulebase*) IF ER AND DE IS OT.

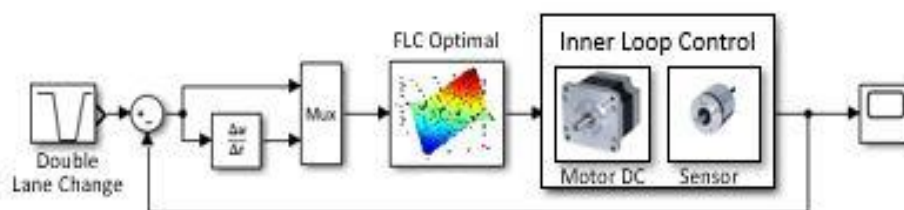
2.3. Optimisasi Sistem Kontrol

Proses optimisasi difungsikan untuk mendapatkan parameter sistem kontrol yang optimal sehingga kinerja system control menjadi optimal. Metode optimisasi yang digunakan adalah berbasis *Swarm* [15] yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO) dan *Modified Quantum Particle Swarm Optimization* (MQPSO). Proses

optimisasi dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan populasi awal partikel secara acak dan kemudian dievaluasi pada model kendaraan. Populasi partikel kemudian disebut sebagai *swarm*, yang mewakili 3 parameter sistem kontrol yang akan dioptimalkan: tiga parameter kontrol pada FLC diperlukan untuk menentukan posisi dan lebar *Membership Function* (MF) yaitu Δ_{ER} , Δ_{DE} dan Δ_{OT} . Selanjutnya partikel akan diperbarui dan dievaluasi kembali pada model sistem kontrol. Hasil evaluasi dibandingkan dengan evaluasi sebelumnya untuk memilih *error* terkecil dan posisi partikel terbaik. Proses evaluasi yang diulang dan diperbarui sampai iterasi maksimum. Selama proses iterasi berlangsung terjadi perubahan *error* hingga diperoleh nilai perubahan *error* menjadi konstan yang berarti proses seleksi kesalahan telah mencapai konvergen, dengan kata lain, posisi partikel telah mencapai posisi terbaik sehingga parameter telah mencapai nilai optimal atau sistem kontrol dapat bekerja secara optimal.

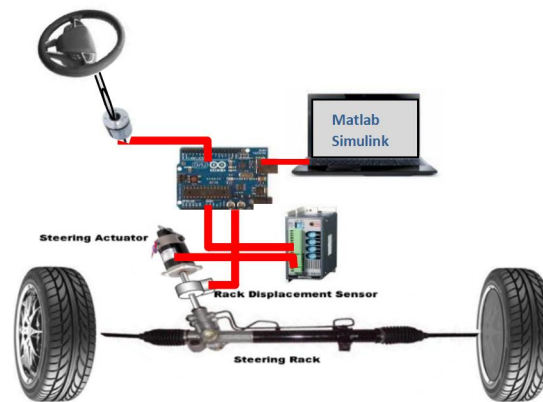
2.4. Pengujian sistem kontrol optimal

Pengujian sistem kontrol optimal merupakan simulasi untuk mendapatkan performansi model sistem kontrol FLC pada *Transfer Function* dari Motor Stepper menggunakan *software* Matlab Simulink yang dinyatakan dalam C-RMS *error*. Sistem kontrol FLC dioptimisasi dengan metode optimisasi berbasis *swarm* sehingga diperoleh sistem kontrol optimal FLC-Swarm Based. Parameter sistem kontrol terdiri dari tiga parameter FLC yaitu ; faktor pengali dari *error* (Δ_{ER}); *delta error* Δ_{DE} ; dan output FLC (Δ_{OT}). Model sistem kontrol pada *Transfer Function* dari Motor Stepper yang dikembangkan selanjutnya disebut sebagai *outer loop control* yang diperuntukkan untuk pengujian secara *software*. Pengujian selanjutnya adalah pengujian menggunakan hardware dengan menggantikan *Transfer Function* dengan *inner loop control* berupa hardware yang terdiri dari: Motor Stepper sebagai *actuator* yang akan dikontrol dan *rotary encoder* sebagai sensor sudut dari motor stepper yang merupakan output sistem kontrol, seperti ditunjukkan pada gambar 1. Sistem kontrol optimal FLC-MQPSO akan mendeteksi *error* antara posisi sudut pergerakan Motor Stepper terhadap *reference* berupa *double lane change* dan selanjutnya memberikan aksi kontrol dengan menggerakkan Motor Stepper sesuai dengan posisi yang diinginkan.



Gambar 1. Inner Loop Control

Pada pengujian menggunakan hardware selanjutnya diterapkan pada prototipe SbW Rig yang dibangun seperti pada gambar 2



Gambar 2. Steer by Wire Rig

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem kontrol menggunakan FLC dan optimisasi tiga nilai parameter FLC menggunakan PSO, QPSO dan MQPSO didapatkan fitness yang terkecil adalah dengan metode MQPSO sebesar 4.1320 dan *error* kinerja sistem kontrol optimal dinyatakan dalam C-RMS *error* yaitu 0.06018. MQPSO mencapai konvergensi (iterasi ke-7) lebih lambat dibanding PSO (iterasi ke-2) dan QPSO (iterasi ke-3) namun *error* kinerja sistem kontrol optimal yang dinyatakan dalam C-RMS *error* juga terkecil yaitu 0.06018. Oleh karena itu sistem kontrol optimal yang diperoleh yang disebut sistem kontrol optimal FLC-MQPSO.

Penerapan sistem kontrol optimal FLC-MQPSO pada hardware berupa prototipe semi-automatic SbW menghasilkan sudut pergerakan roda kendaraan dapat dipertahankan menurut *set point* dengan nilai C-RMS *error* 6,712. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat keterlambatan proses simulasi dengan hardware yang disebabkan oleh *operating time* dari pergerakan putaran motor stepper maksimum mencapai 60 ms dan *release time* maksimum 15 ms seperti ditunjukkan pada table 1.

Tabel 1. C-RMS Error hasil pengujian Software dan Hardware

No	Pengujian	C-RMS Error
1	Software (MQPSO)	0.06018
2	Hardware	6.712
Δ		6.76418

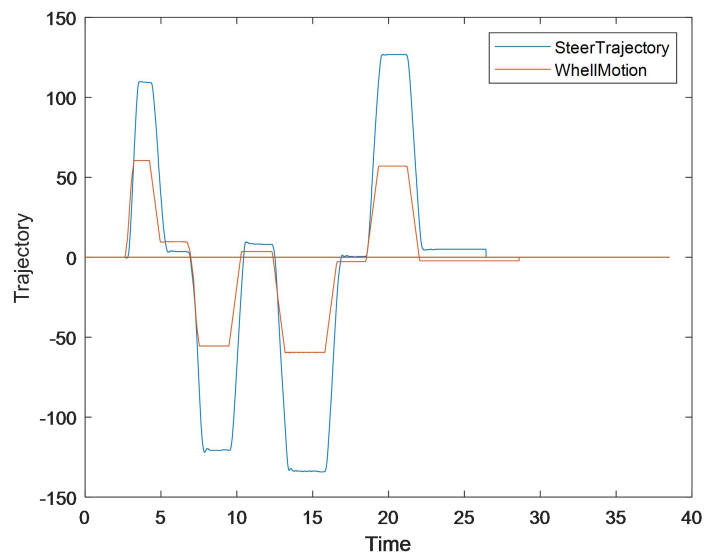
Prototipe *Semi-automatic SbW* dirancang memiliki dua macam rasio antara *steer* dengan roda depan yang bergantung pada kecepatan kendaraan sebagaimana ditunjukkan pada table 3.

Tabel 3. Rasio sudut roda depan kendaraan terhadap sudut *steer*

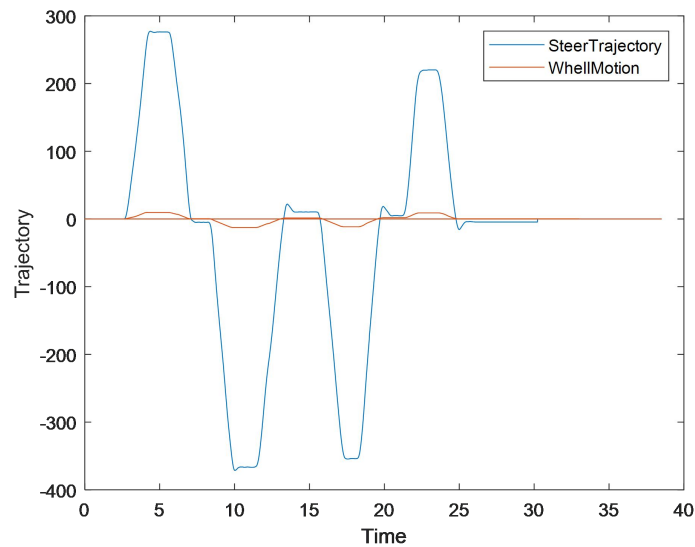
Rasio	Sudut maks Roda (Deg)	Motor Stepper			Sudut maks <i>Steer</i> (Deg)	Kecepatan kendaraan
		Pulse/Step	Deg/Step (Deg)	Sudut maks (Deg)		
1 : 6,25	20	100%	0,72	90	125	< 10 km/h
1 : 25	20	25%	0,18	90	500	> 10 km/h

Berdasarkan data perencanaan bahwa radius maksimum sudut roda depan kendaraan adalah 20°, dengan menggunakan penghubung antara motor stepper dengan roda depan kendaraan digunakan perangkat mekanik *rack-pinion* yang sudut tersebut bersesuaian dengan radius putaran

motor stepper sebesar 90° sehingga rasio antara roda depan kendaraan terhadap motor stepper adalah 1 : 4.5. Step pergerakan motor stepper sesuai dengan data sheet motor stepper adalah 0.72° untuk setiap pulse data. Sudut putaran maksimum *steer* yang diperlukan untuk menggerakkan roda depan kendaraan sebesar maksimum 20° adalah $90^\circ \times 0.72^\circ$ atau sama dengan 125° , sehingga rasio antara radius maksimum roda depan kendaraan terhadap radius maksimum sudut input *steer* adalah 1 : 6,25 yang memberikan arti bahwa setiap 1° pergerakan roda depan kendaraan sama dengan $6,25^\circ$ sudut input *steer*. Rasio ini sangat baik digunakan pada saat manuver kendaraan pada kecepatan rendah yaitu di bawah 10 km/h seperti pada saat kendaraan harus bermanuver di area parkir, respon kontrol ditunjukkan pada gambar 3. Sedangkan pada kecepatan di atas 10 km/h, setiap step pergerakan motor stepper diperkecil menjadi 25% yaitu $0,72^\circ/4$ sama dengan $0,18^\circ$ untuk setiap pulse data, sehingga rasio menjadi meningkat yang berarti bahwa untuk menggerakkan roda depan kendaraan sebesar maksimum 20° maka sudut maksimum input *steer* yang diperlukan adalah $90^\circ \times 0.18^\circ$ sama dengan 500° . Dengan demikian rasio antara radius maksimum roda depan kendaraan terhadap radius maksimum sudut input *steer* adalah 1 : 25 yang memberikan arti bahwa setiap 1° pergerakan roda depan kendaraan sama dengan 25° sudut input *steer* seperti ditunjukkan pada gambar 4. Rasio ini lebih cocok untuk mengemudikan kendaraan dengan kecepatan sedang maupun tinggi yaitu di atas 10 km/h sehingga diperoleh pergerakan manuver kendaraan yang lebih halus dan stabil.



Gambar 3. Respon kontrol pada kecepatan di bawah 10 km/h



Gambar 4. Respon kontrol pada kecepatan di atas 10 km/h



Gambar 7. Prototipe Semi-automatic SbW Rig

4. KESIMPULAN

Sistem kontrol optimal FLC-MQPSO yang dikembangkan pada model *Semi-automatic SbW system* adalah untuk mendapatkan sinkronisasi sudut kemudi (*steer angle*) terhadap arah pergerakan roda kendaraan. Hasil pengujian optimisasi didapatkan bahwa MQPSO dapat lebih mengoptimalkan sistem kontrol FLC dibanding dengan PSO maupun QPSO dengan performansi C-RMS error sebesar 0.06018. Hasil pengujian menggunakan prototipe *SbW* yang dilengkapi dengan

rack-pinion dan *steer* diperoleh performansi C-RMS *error* sebesar 6,712. Sistem kontrol optimal FLC-MQPSO pada prototipe *SbW Rig* memiliki dua macam rasio antara sudut kemudi terhadap sudut roda kendaraan yaitu rasio 1 : 6,25 untuk kecepatan dibawah 10 km/h sehingga cocok untuk dioperasikan saat kendaraan sedang manuver di area parkir dan rasio 1 : 25 untuk kecepatan di atas 10 km/h yang cocok untuk dioperasikan saat kendaraan melaju dengan kecepatan sedang atau tinggi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya disampaikan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui PTUPT. Juga diucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Elektro dan Teknik Mesin Universitas Widyagama Malang yang telah memfasilitasi dan mendukung proses penelitian ini.

6. REFERENSI

- [1] J. Sterthoff, R. Henze, and F. Küçükay, "Vehicle handling improvements through Steer-by-Wire," *Automot. Engine Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 91–98, Jun. 2021, doi: 10.1007/s41104-021-00079-0.
- [2] S. A. Mortazavizadeh, A. Ghaderi, M. Ebrahimi, and M. Hajian, "Recent Developments in the Vehicle Steer-by-Wire System," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1226–1235, Sep. 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.3004694.
- [3] M. Li and L. Eckstein, "Fail-Operational Steer-By-Wire System for Autonomous Vehicles," in *2019 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Sep. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICVES.2019.8906395.
- [4] Y. Park and I. Jung, "Semi-Active Steering Wheel for Steer-By-Wire System," in *SAE Technical Paper*, Oct. 2001. Accessed: Nov. 02, 2022. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/1792180>
- [5] F. Hunaini, F. Nugroho, P. Suwandono, and G. Subiyakto, "The cascade optimal control of steer by wire system using hardware in the loop simulations," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp764-772.
- [6] F. Nugroho, M. Faisal, and F. Hunaini, "Autonomous Groups Particles Swarms Optimisation (AGPSO) to Optimise the Fuzzy Membership Function in the Automatic Watering Plant Case Study," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1908, no. 1, p. 012022, Jun. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1908/1/012022.
- [7] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Optimization of automatic steering control on a vehicle with a steer-by-wire system using particle swarm optimization," *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24; 2, pp. 541–557, Feb. 2016.
- [8] K. G. Abdulhussein, N. M. Yasin, and I. J. Hasan, "Comparison between butterfly optimization algorithm and particle swarm optimization for tuning cascade PID control system of PMDC motor," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 12, no. 2, pp. 736–744, Jun. 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i2.pp736-744.
- [9] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Optimization Control System using the Quantum Behaved Particle Swarm Optimization on Vehicle Steering Control System with Steer-by-Wire System," *J. Teknol.*, vol. 71, no. 2, pp. 91–98, Nov. 2014.
- [10] F. Hunaini, E. Ishak, F. Rofii, S. Setiawidayat, and Istiadi, "Hardware in the Loop Simulation of Control Optimal of DC Motor Base on Modified Quantum-Behaved Particle Swarm

- Optimization," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1908, no. 1, p. 012017, Jun. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1908/1/012017.
- [11] E. Ishak, F. Hunaini, and F. Rofii, "SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN PID-MQPSO," *SENTIA 2016*, vol. 8, no. 2, 2016, Accessed: Aug. 08, 2019. [Online]. Available: <http://sentia.polinema.ac.id/index.php/SENTIA2016/article/view/74>
- [12] N. Ahmad, A. Meng, and M. Sultan, "Applications of Hardware-in-the-Loop Simulation in Automotive Embedded Systems," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2020-01-1289, Apr. 2020. doi: 10.4271/2020-01-1289.
- [13] P. Maurya, H. M. Morishita, A. Pascoal, and A. P. Aguiar, "A Path-Following Controller for Marine Vehicles Using a Two-Scale Inner-Outer Loop Approach," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4293, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22114293.
- [14] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "The Optimal Steering Control System using Imperialist Competitive Algorithm on Vehicles with Steer-by-Wire System," *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 25-35, 2015.
- [15] S. M. Lim, K. Y. Leong, S. M. Lim, and K. Y. Leong, *A Brief Survey on Intelligent Swarm-Based Algorithms for Solving Optimization Problems*. IntechOpen, 2018. doi: 10.5772/intechopen.76979.