

SIMULASI KONTROL OPTIMAL LATERAL MOTION PADA MODEL STEER BY WIRE

Fachrudin Hunaini^{1*)}, Purbo Suwandono²⁾, Gatot Subiyakto²⁾, Sumartono Ali Putra¹⁾

¹⁾ Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Widyagama Malang, Kota Malang

²⁾ Program Studi D3 Mesin Otomotif, Universitas Widyagama Malang, Kota Malang

*Email Korespondensi: fachrudin_h@widyagama.ac.id

ABSTRAK

Tujuan paper ini adalah mengoptimalkan kinerja sistem kontrol *lateral motion* pada model sistem kemudi kendaraan yang menggunakan *Steer by Wire system*, sehingga kendaraan dapat selalu dipertahankan pergerakannya pada lintasan yang diinginkan. Strategi sistem kontrol yang dibangun adalah *Fuzzy Logic (FLC) Control* sebagai kontrol *lateral motion* dan untuk mendapatkan sistem kontrol yang optimal digunakan metode optimisasi *Modified-Quantum Particle Swarm Optimization (MQPSO)*. Simulasi dilakukan secara *Software in The Loop Simulations* pada model dinamika kendaraan secara *real time*. Hasil simulasi sistem kontrol *lateral motion* menggunakan FLC yang dioptimisasi oleh MQPSO menunjukkan bahwa kendaraan dapat melaju sesuai *desired trajectory* dalam bentuk *double lane change*. dengan nilai C-RMS error adalah 0.009807 yang lebih kecil dibanding dengan menggunakan PSO (0.021139) maupun QPSO (0.019200).

Kata kunci: Steer by Wire, FLC, MQPSO, SILS

ABSTRACT

The purpose of this paper is to optimize the performance of the lateral motion control system on a vehicle steering system model that uses the Steer by Wire system, so that the vehicle can always be maintained on the desired trajectory. The control system strategy that is built is Fuzzy Logic (FLC) Control as a lateral motion control and to obtain an optimal control system, the Modified-Quantum Particle Swarm Optimization (MQPSO) optimization method is used. Simulations are carried out using Software in The Loop Simulations on the vehicle dynamics model in real time. The simulation results of the lateral motion control system using FLC optimized by MQPSO show that the vehicle can drive according to the desired trajectory in the form of double lane change. with a C-RMS error value of 0.009807 which is smaller than using PSO (0.021139) and QPSO (0.019200).

Keywords: Steer by Wire, FLC, MQPSO, SILS

PENDAHULUAN

Teknologi *Steer by wire (SbW) system* adalah teknologi dimana pada sistem Steer by Wire (SbW), penghubung mekanis konvensional antara kemudi dan roda depan diganti dengan aktuator elektronik [1][2]. Sedangkan *Fully automatic SbW* adalah sistem SbW tanpa menggunakan roda kemudi (*steer*) sehingga tidak diperlukan seorang pengemudi, namun pergerakan kendaraan ditentukan oleh *trajectory* yang terprogram (*lane guidance*) [3][4] atau dapat juga menggunakan *Global Positioning System (GPS)* [5]. Berbagai pengujian SbW system telah dilakukan antara lain pada kendaraan sebenarnya [6], *small vehicle* [7], [8], *experiment vehicle* [9] maupun pada model kendaraan yang merupakan kumpulan persamaan matematis dari dinamika kendaraan [6]. Pola pengujian dengan menggunakan model kendaraan secara matematis memiliki beberapa kelebihan antara lain parameter kendaraan dapat menyesuaikan pada kendaraan sebenarnya secara utuh, hemat biaya, perlakuan pengujian yang berulang-ulang tidak beresiko pada kecelakaan

dan derajat kebebasan pergerakan (*Degree of Freedom*) dari dinamika kendaraan sangat bervariasi menyesuaikan terhadap kebutuhan [10][11].

Beberapa peneliti memperbaiki kinerja SbW, antara lain dengan mengajukan desain kontrol [12], mengkaji sisi *failure* [13], mendesain *mode sliding adaptif* [9]. Peneliti lain mengusulkan model kontrol yang dapat menyesuaikan dari aksi redundan [14]. Penggunaan kontrol *Haptik* juga di investigasi untuk melacak *target steering* [15]. Pengendalian kendaraan direpresentasikan sebagai 3 *Degree of Freedom* (DOF), yaitu pergerakan *body* kendaraan secara longitudinal, lateral serta yaw. *Longitudinal* merupakan pergerakan sumbu y, *lateral* merupakan pergerakan terhadap sumbu x, dan yaw merupakan pergerakan mengitari sumbu z [4]. Ketidakstabilan *lateral* kendaraan dapat disebabkan oleh banyak faktor seperti angin samping yang tiba-tiba, kehilangan tekanan ban, atau pengereman mendadak pada kondisi jalan yang berbeda. Sehingga perlu diterapkan kontrol *lateral* [10] [16].

Sistem kontrol kemudi yang banyak digunakan adalah *Fuzzy Logic Control* (FLC) baik dengan atau tanpa menggunakan metode optimisasi [17][18][19], namun dalam pelaksanaannya perlu dikembangkan simulasi sistem kontrol optimal [20]. Salah satu metode optimasi yang memiliki keunggulan yaitu sederhana dan cepat adalah metode optimasi berbasis *Swarm Optimization* seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO) maupun *Modified-Quantum Particle Swarm Optimization* (MQPSO) [21].

Berdasarkan uraian di atas, maka pada paper ini disajikan hasil penelitian berupa *Software in the Loop Simulations* (SILS) dengan variable input berupa *desired trajectory* pada sebuah model kendaraan untuk menguji kinerja sistem kontrol optimal pada SbW system agar selalu dapat mempertahankan pergerakan kendaraan di lintasan yang diinginkan dengan menggunakan strategi sistem kontrol FLC sebagai kontrol *lateral motion* yang dioptimisasi menggunakan metode optimasi berbasis *Swarm Optimization* dengan membandingkan tiga metode optimisasi PSO, QPSO dan MQPSO.

METODE PENELITIAN

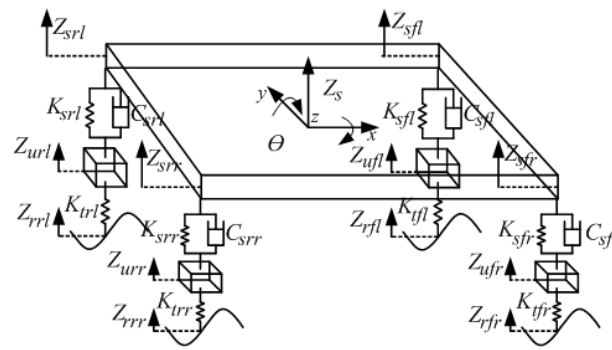
1. Model dinamika kendaraan

Model dinamika kendaraan yang digunakan pada penelitian ini adalah model kendaraan dengan 10-DOF yang terdiri dari 7-DOF model *ride* kendaraan dan 3-DOF model *handling* kendaraan [22]–[24].

2. Model Vehicle Ride

Vehicle Ride model adalah dinamika pergerakan bagian kendaraan ke arah vertikal. Pada penelitian ini digunakan 7-DOF system [22]–[24] seperti pada gambar 1, yang terdiri dari:

1. Pantulan akibat dari *body* kendaraan (*Bouncing of the car body*) (Z_s)
2. Anggukan akibat dari *body* kendaraan (*Pitching of the car body*) (θ)
3. Riakan akibat dari *body* kendaraan (*Rolling of the car body*) (φ):
4. Gerakan Arah Vertikal dari semua ban (*Vertical Direction for each wheel*):
 - a. Untuk roda depan kiri ($m_u \ddot{Z}_{u,fl}$)
 - b. Untuk roda depan kanan ($m_u \ddot{Z}_{u,fr}$)
 - c. Untuk roda belakang kiri ($m_u \ddot{Z}_{u,rl}$)
 - d. Untuk roda belakang kanan ($m_u \ddot{Z}_{u,rr}$)

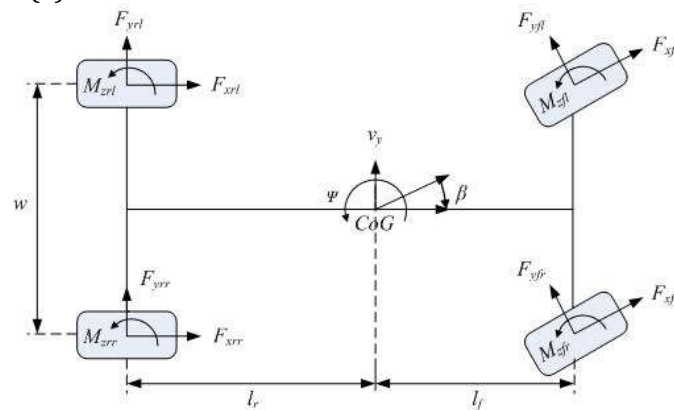


Gambar 1. Model Vehicle Ride

3. Model Vehicle Handling

Penanganan Kendaraan (*Vehicle Handling*) adalah dinamika pergerakan *body* kendaraan ke arah horizontal. Pada penelitian ini digunakan 3-DOF system [22], [23], [25], seperti pada gambar 2, yang terdiri dari:

- Lateral Motion* (a_y)
- Longitudinal Motion* (a_x)
- Yaw Motion* ($\ddot{r}$)



Gambar 2. Model Vehicle Handling

4. Fuzzy Logic sebagai sistem kontrol lateral motion

Sistem kontrol *Lateral* diperlukan untuk mengatur arah roda depan kendaraan untuk menyesuaikan lintasan yang diperlukan (*lookup table x - y trajectory*) dalam bentuk *double lane change*. FLC digunakan untuk menekan kesalahan antara *lateral motion* (y) yang bersesuaian dengan *longitudinal motion* (x) dari *desired trajectory*. Struktur utama dari FLC, antara lain, terdiri dari [25], [26]:

- Fuzzifikasi* variabel renyah, di mana dalam proses ini menggunakan dua input yaitu *error* $E(n)$ dan *delta error* $DE(n)$, yang diubah menjadi variabel *fuzzy* menggunakan teknik *membership functions* (MF) untuk mengekspresikan derajat keanggotaan *fuzzy*. Bentuk MF yang digunakan dalam penelitian ini adalah satu bentuk segitiga dan dua trapesium pada *input* (*error* dan *delta error*) dan *output* dengan *language term*; *Negative* (N), *Zero* (Z), *Positive* (P).
- Perancangan sistem kontrol FLC Optimal adalah mendesain parameter Fungsi Keanggotaan atau *Membership Function* (MF) untuk dapat dioptimisasi. Dalam penelitian ini, lebar dan posisi titik pusat dari bentuk setiap MF dapat diubah berdasarkan pada nilai faktor pengali (Δ) dari domain variable. Fungsi faktor pengali yang diusulkan untuk menentukan bentuk MF sehingga semua parameter masing-masing MF merupakan fungsi dari Δ . Nilai Δ_i (Δ_{ER} , Δ_{DE} , Δ_{OT}) terdiri dari; Δ_{ER} sebagai faktor pengali parameter MF pada *input error*; Δ_{DE} sebagai faktor pengali parameter MF pada *input delta error*; dan Δ_{OT} sebagai faktor pengali parameter MF

pada *output* FLC. Nilai faktor pengali Δ_i ditentukan melalui proses pembelajaran diulang-ulang sampai nilai optimal tercapai dengan menggunakan metode optimisasi berbasis *Swarm Optimization*.

- c. Sekumpulan aturan *fuzzy* yang digunakan dikelompokkan ke dalam *rule base* sebagai dasar dari pengambilan keputusan (proses inferensi) untuk mendapatkan tindakan dari *output* sinyal kontrol dari *input* kondisi. Total *rule base* yang dibutuhkan adalah 9 aturan yang disajikan pada Tabel 1.

Table 1. *Rule base* dari FLC

Delta Error (DE)	Error (ER)		
	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Basis pengetahuan *fuzzy* memiliki relasi *fuzzy* dari hubungan setiap aturan sebagai penerapan fungsi implikasi. Pada penelitian ini digunakan fungsi implikasi metode MIN, sehingga proporsi yang mengikuti IF (antesenden) dan proporsi yang mengikuti THEN (konsekuen) menggunakan operator AND. Pada tabel 1 terdiri dari 9 aturan kontrol yang merupakan korelasi antara *error* (ER) dan *delta error* (DE) sebagai masukan pada kontrol *fuzzy*.

- d. *Defuzzifikasi* yang digunakan merupakan metode mencari pusat gravitasi (COG) dari himpunan agregasi yaitu metode *defuzzifikasi Centroid*.

5. Optimal Control System Strategy

Metode Optimisasi yang dipakai dalam penelitian ini berbasis *Swarm Optimization* yaitu MQPSO yang dibandingkan dengan metode optimisasi pendahulunya yaitu PSO dan QPSO. Proses awal optimisasi adalah inisialisasi populasi partikel secara *random* dan dievaluasi pada model kendaraan. Populasi partikel selanjutnya disebut sebagai *swarm*, yang mewakili 3 parameter sistem kontrol FLC yang diperlukan sebagai factor pengali untuk menentukan posisi dan lebar MF yaitu Δ_{ER} , Δ_{DE} , Δ_{OT} . Proses berikutnya partikel diganti dengan partikel baru dan dievaluasi lagi hingga iterasi maksimum. Dalam proses iterasi bila sudah didapati nilai perubahan *error* yang konstan maka proses iterasi telah mencapai posisi konvergen yang berarti telah diperoleh posisi partikel yang terbaik sehingga parameter telah mencapai nilai optimal atau sistem kontrol dapat bekerja secara optimal [21] [24]. Tahapan optimisasi sebagai berikut:

a. Langkah 1. Inisialisasi parameter

Parameter metode optimisasi menggunakan PSO, QPSO dan MQPSO adalah; jumlah partikel ditentukan sebanyak 30; *iterasi* maksimum diatur sampai pada 30 iterasi; *social and cognitive constant* ditentukan sama dengan 2; nilai inersia ditentukan menggunakan *linier decreasing inertia weight* ($w_{\max} = 0.9$ dan $w_{\min} = 0.4$); *contraction-expansion coefficient* (β) ditentukan: 1,0 - 0,4; inisialisasi parameter dari variabel yang dioptimalkan adalah $\Delta_i = (\Delta_{ER}, \Delta_{DE}, \Delta_{OT})$.

b. Langkah 2. Inisialisasi *swarm* / *current position*

Inisialisasi *swarm* / *current position* secara acak (*random*)

c. Langkah 3. Evaluasi inisialisasi populasi

Evaluasi dilakukan untuk memperoleh *fitness* dari setiap partikel, ukuran *fitness of particle* menggunakan kriteria minimalisasi *Integral Time-weighted Absolute Error* (ITAE) [27].

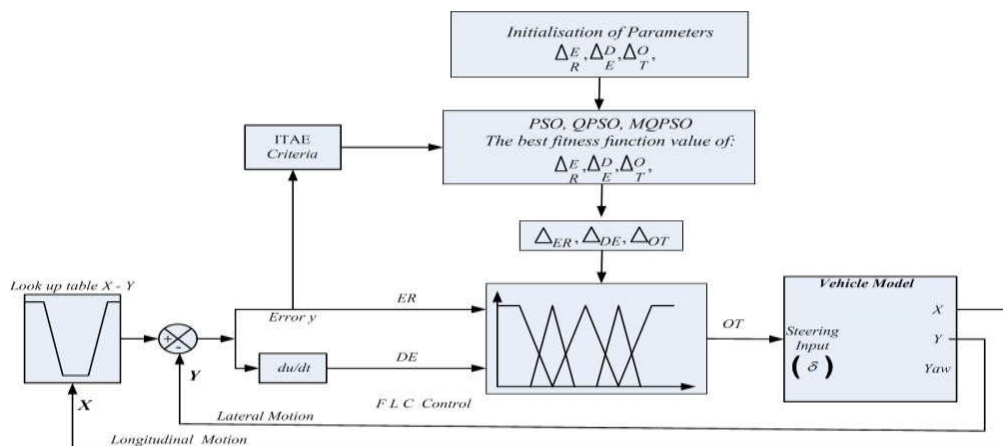
d. Langkah 4. Evaluasi partikel baru

Pada tahap ini, setiap partikel baru akan dievaluasi kembali dalam sistem kontrol hingga dicapai jumlah *iterasi* mencapai maksimum, pada setiap *iterasi*, posisi partikel dievaluasi menggunakan ITAE untuk mendapatkan *fitness of particles*.

Pada iterasi berikutnya, *the best global position* diperbarui lagi hingga jumlah iterasi maksimum dicapai dan pada saat proses tercapai konvergensi maka *the best global position* dari partikel bersesuaian dengan indeks dari *the best global fitness* yang berarti berada pada posisi partikel telah optimal (Δ_i).

6. Simulations Startegy

Sistem kontrol mengatur arah roda depan kendaraan sesuai dengan *desired trajectory* dalam hal ini berupa *double lane change*. Fungsi sistem kontrol FLC yang dibangun digunakan untuk menekan kesalahan antara aktivitas *lateral* (y) yang terkait dengan gerakan *longitudinal* lintasan yang diperlukan (x) [25]. Oleh karena itu, kontrol optimal diperlukan dengan memodifikasi nilai parameter tersebut untuk mendapatkan nilai optimal menggunakan MQPSO yang dibandingkan dengan PSO dan QPSO. Gambar 3 Menggambarkan skema blok *Software in the Loop Simulations* sistem kontrol pada model *fully automatic Steer by Wire*.



Gambar 3. *Software in the Loop Simulation* (SILS) Struktur sistem kontrol kemudi kendaraan pergerakan *Lateral* menggunakan FLC yang dioptimalkan dengan *Swarm Optimizations*

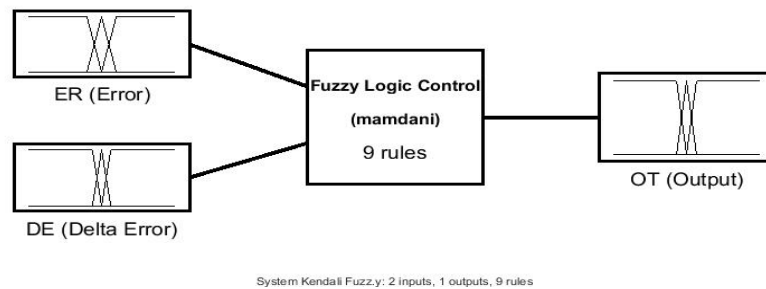
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan secara SILS menggunakan kontrol FLC pada pergerakan *lateral* yang dioptimisasi menggunakan MQPSO dan dibandingkan dengan hasil optimisasi menggunakan PSO dan QPSO. Hasil uji SILS berupa simulasi optimisasi sistem kontrol pergerakan lateral menggunakan FLC diperoleh 3 nilai parameter faktor pengali yaitu Nilai Δ_i (Δ_{ER} , Δ_{DE} , Δ_{OT}) sebagaimana tabel 2 dengan kinerja hasil optimisasi ditunjukkan dalam ukuran *Continues-Root Mean Square* (C-RMS) Error.

Tabel 2. Hasil Optimisasi FLC

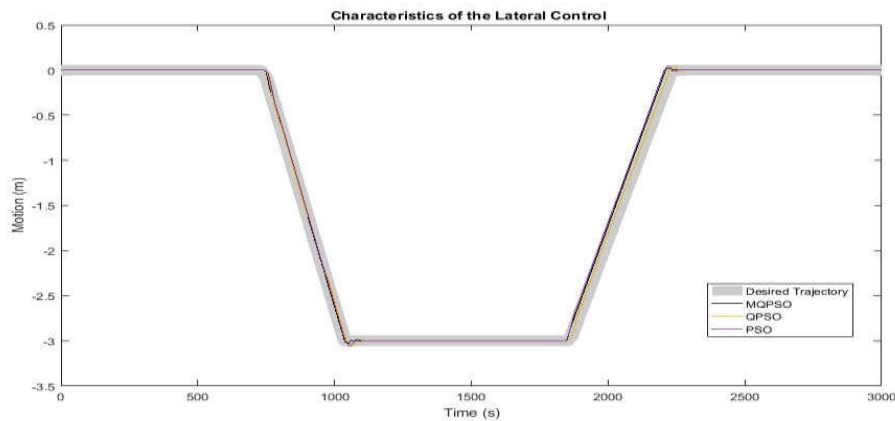
Metode Optimisasi	ITAE	Parameter (Δ)			C - RMS error Lateral
		ER	DE	OT	
PSO	2.31E-44	0.627	30.6399	58.3795	0.021139
QPSO	7.81E-49	0.393386	58.24034	33.40032	0.019200
MQPSO	2.11E-49	0.376872	63.02984	25.37264	0.009807

Parameter (Δ) adalah faktor pengali untuk menentukan lebar dan titik pusat MF pada *input* dan *output* FLC, Gambar 4. Menunjukkan hasil komposisi MF yang optimal.

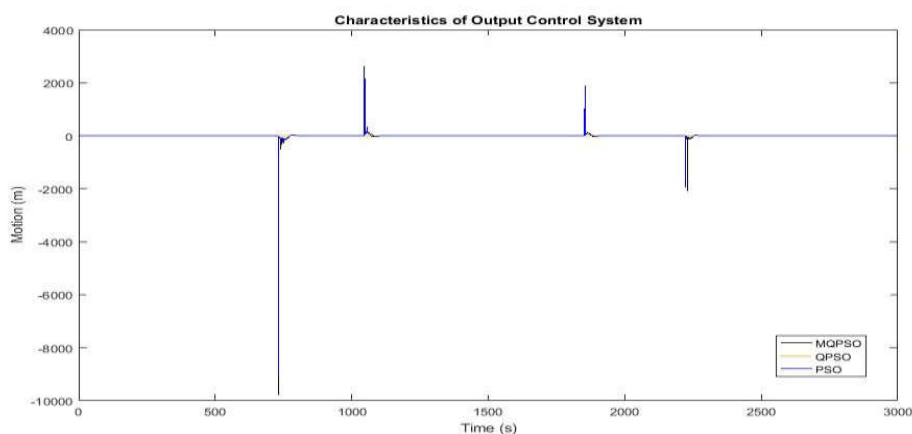


Gambar 4. MF optimal menggunakan MQPSO

Performansi kinerja sistem kontrol optimal pergerakan *lateral* menggunakan FLC dari sistem kemudi kendaraan melalui pengujian SILS dinyatakan dalam perbandingan input *desired trajectory* terhadap output pergerakan *lateral* dengan kontrol optimal FLC berbasis metode *swarm optimization* ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Output Lateral (FLC) Control



Gambar 6. Output FLC Control

KESIMPULAN

Performansi kinerja simulasi sistem kontrol optimal dari model sistem kemudi kendaraan melalui pengujian SILS dapat mempertahankan pergerakan kendaraan selalu terjaga pada *desired trajectory*. Sistem kontrol yang dioptimalkan menggunakan MQPSO mempunyai C-RMS error 0.009807 dari *lateral motion* lebih kecil dibanding dengan yang dioptimalkan menggunakan PSO (0.021139) maupun QPSO (0.019200).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapkan terima kasih Disampaikan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia, dan Laboratorium Teknik Elektro dan Teknik Mesin Universitas Widyagama Malang, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] S. A. Mortazavizadeh, A. Ghaderi, M. Ebrahimi, and M. Hajian, "Recent Developments in the Vehicle Steer-by-Wire System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1226–1235, Sep. 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.3004694.
- [2] B. Ma and Y. Wang, "Adaptive type-2 fuzzy sliding mode control of steer-by-wire systems with event-triggered communication," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 235, no. 9, pp. 2442–2455, Aug. 2021, doi: 10.1177/0954407021995390.
- [3] L. Zhang, Z. Wang, X. Ding, S. Li, and Z. Wang, "Fault-Tolerant Control for Intelligent Electrified Vehicles Against Front Wheel Steering Angle Sensor Faults During Trajectory Tracking," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65174–65186, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075325.
- [4] Y. Sj, A. E, S. U, S. Shetty, and B. Babali, "Lateral and Longitudinal Control of Self-driving Car with Enhanced Trajectory tracking using Direct Yaw Stability Control," *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, 2021, doi: 10.1109/ICAECT49130.2021.9392542.
- [5] J. Kang, R. Hindiyeh, S. Moon, J. C. Gerdes, and K. Yi, "Design and Testing of a Controller for Autonomous Vehicle Path Tracking Using GPS/INS Sensors," 2008, doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.00355.
- [6] X. Zhao and H. Chen, "Optimal control of the automatic steering system," Jul. 2011, pp. 39–43. doi: 10.1109/ICVES.2011.5983784.
- [7] A. Adriansyah, "PERANCANGAN PENGENDALI ROBOT BERGERAK BERBASIS PERILAKU MENGGUNAKAN PARTICLE SWARM FUZZY CONTROLLER," *Jurnal Ilmu Komputer dan Informasi*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, May 2012.
- [8] L. Cai, A. B. Rad, and W.-L. Chan, "A Genetic Fuzzy Controller for Vehicle Automatic Steering Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 529–543, Mar. 2007, doi: 10.1109/TVT.2006.889576.
- [9] J. Zhang *et al.*, "Adaptive Sliding Mode-Based Lateral Stability Control of Steer-by-Wire Vehicles With Experimental Validations," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 9, pp. 9589–9600, Sep. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3003326.
- [10] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Model and Simulation of Vehicle Lateral Stability Control," Surabaya, ITS, Dec. 2010, p. 26.
- [11] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Vehicle Stability Control On Steer By Wire System Using Fuzzy Logic," Shandong University, Jinan, China, Sep. 2011, pp. 3-4-p.
- [12] G. Zhu, H. Yang, and F. Yu, "Controller Design for an Automobile Steer-By-Wire System," in *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2019, pp. 1492–1497. doi: 10.1109/ISIE.2019.8781444.
- [13] 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.

- [14] V. Ewald and U. Konigorski, "Model-Matching-Control of a Redundantly Actuated Steer-by-Wire-System," in *2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Aug. 2020, pp. 194–200. doi: 10.1109/CCTA41146.2020.9206283.
- [15] J. Lee, K. Yi, D. Lee, B. Jang, M. Kim, and S. Hwang, "Haptic control of steer-by-wire systems for tracking of target steering feedback torque," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 234, no. 5, pp. 1389–1401, Apr. 2020, doi: 10.1177/0954407019879298.
- [16] L. Chen, Z. Li, J. Yang, and Y. Song, "Lateral Stability Control of Four-Wheel-Drive Electric Vehicle Based on Coordinated Control of Torque Distribution and ESP Differential Braking," *Actuators*, vol. 10, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/act10060135.
- [17] M. Zaidi Mohd Tumari *et al.*, "The Control Schemes of Vehicle Steer by Wire System by using Fuzzy Logic and PID Controller," *Res. J. Applied Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 137–145, Nov. 2019, doi: 10.36478/rjas.2018.137.145.
- [18] 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 Elec Eng & Comp Sci*, vol. 24; 2, pp. 541–557, Feb. 2016.
- [19] 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," vol. 1908, p. 012022, Jun. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1908/1/012022.
- [20] J. Nah and S. Yim, "Optimization of control allocation with ESC, AFS, ARS and TVD in integrated chassis control," *J Mech Sci Technol*, vol. 33, no. 6, pp. 2941–2948, Jun. 2019, doi: 10.1007/s12206-019-0541-5.
- [21] 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.
- [22] R. Darus and Y. Md. Sam, "Modeling and control active suspension system for a full car model," in *2009 5th International Colloquium on Signal Processing Its Applications*, Mar. 2009, pp. 13–18. doi: 10.1109/CSPA.2009.5069178.
- [23] K. Hudha, Z. Abd. Kadir, Md. R. Said, and H. Jamaluddin, "Modelling, validation and roll moment rejection control of pneumatically actuated active roll control for improving vehicle lateral dynamics performance," *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, vol. 1, no. 2/3, p. 122, 2009, doi: 10.1504/IJESMS.2009.027576.
- [24] 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," *Jurnal Teknologi*, vol. 71, no. 2, pp. 91–98, Nov. 2014.
- [25] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Lateral and Yaw Motion Control of The Vehicle using Fuzzy Logic and PID being Optimized by Firefly Algorithm," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 87, no. 1, pp. 16–24, May 2016.
- [26] A. Z. Lotfi, "Fuzzy Logic Toolbox," *MATLAB User's Guide*, 1998,
- [27] E. Staff, "A stepwise method for tuning PI controllers using ITAE criteria," *Embedded.com*, Jul. 25, 2012.