

PENGEMBANGAN SISTEM KOMBINASI KERJA REM, STEER, DAN TRAKSI BERBASIS LiDAR 3D UNTUK KENDARAAN LISTRIK OTONOM RODA TIGA

Fabian Akbar^{*1}, Arief Suryadi Satyawan², Ike Yuni Wulandari³, Prio Adjie Utomo⁴, Riza Ayu Putri⁵, I Gusti Ayu Putri Surya Paramita⁶, Ni Kadek Emy Ismarawati⁷, Rinda Safana Linggi⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8} Universitas Nurtanio, Bandung

Email: ¹fabianakbar.te19@student.unnur.ac.id, ²arief.suryadi@akane.waseda.jp, ³keyuni@unnur.ac.id, ⁴prio.lp19@student.unnur.ac.id, ⁵riza.te19@student.unnur.ac.id, ⁶putrisuryaparamita@gmail.com, ⁷emyiswarawatti@gmail.com, ⁸rinda.tp19@studentunnur.ac.id

*Penulis Korespondensi

(Naskah masuk: 29 November 2024, diterima untuk diterbitkan: 14 Juni 2024)

Abstrak

Selama beberapa waktu terakhir, pengembangan sistem deteksi objek berbasis LiDAR telah menjadi fokus utama bagi para pengembang kendaraan listrik otonom. Banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan dan mengoptimalkan teknologi ini guna mencapai mobilitas otonom yang lebih canggih dan aman. Begitu pula yang dilakukan oleh BRIN, Pengembangan sistem deteksi objek berbasis LiDAR telah berhasil dilakukan hingga rekonstruksi dan posisi objek dapat ditemukan. Namun demikian pemanfaatannya belum mencakup sistem *safety* dan *guidance* dalam hal ini mengendalikan gerak laju kendaraan, rem, dan kemudi. Untuk memaksimalkan hasil sistem pendeteksian objek berbasis LiDAR yang telah diperoleh sebelumnya, maka pada penelitian ini akan dikembangkan sistem tersebut sehingga dapat digunakan untuk mengkombinasikan kerja laju kendaraan, rem, dan kemudi secara otomatis. Sistem *safety* dan *guidance* ini dilakukan dengan mengembangkan metoda manuver untuk menghindari objek yang pendekatannya dapat dilakukan berdasarkan metoda fuzzy mamdani. Adapun algoritma di kembangkan dengan menggunakan python pada Jetson AGX Xavier, sedangkan untuk memproses gerak kendali manuver yang dihasilkan dilakukan pada Mikrokontroler Teensy 4.1. Sistem *safety* dan *guidance* ini telah diterapkan pada kendaraan listrik roda tiga sederhana, dan dapat membantu kendaraan tersebut dapat bermanuver menghindari objek di depannya hingga 5 meter.

Kata kunci: kendaraan listrik otonom, LiDAR, deteksi objek, panduan, keselamatan

DEVELOPMENT OF A COMBINATION SYSTEM OF BRAKE, STEER AND TRACTION WORK BASED ON 3D LiDAR FOR THREE-WHEELED AUTONOMOUS ELECTRIC VEHICLES

Abstract

Recently, the development of LiDAR based object detection system has become mine focus of research on autonomous vehicle worked by many developers around the world. This development is not only carried out by the major industries, but also developed by the research and innovation agency in Indonesia (BRIN), the development being worked by the BRIN produce a system that provide reconstructed object and position data in 3D. However, they have not been used for safety and guidance system that collaborate wheel drive, braking, and steering mechanism. This research develops safety and guidance system that utilize of the 3D reconstructed object and the position data provided by the LiDAR. This system is purposed to avoid object in front of the autonomous vehicle by carrying a maneuver mechanism. The maneuver mechanism performs an acceleration / deceleration, breaking, and steering signals output simultaneously, and deliver them to the wheel drive, braking, and steering system on three-wheel electric vehicle. The algorithm of maneuver scenario is built based on Mamdani's fuzzy methods, and it is developed using python on Jetson AGX Xavier. Whilst the output of the maneuver mechanism run on a microcontroller Teensy 4.1. This safety and guidance system has been applied on the three-wheel electric vehicle, and it helps the vehicle to maneuver avoiding a collision with objects five meter in front of the car.

Keywords: electric autonomous vehicle, LiDAR, Object detection, guidance, safety

1. PENDAHULUAN

Dalam *Autonomous Vehicles* (AVs), persepsi merupakan satu pilar fundamental yang memanfaatkan sensor seperti kamera dan LiDAR (*Light Detection and Ranging*) untuk memahami lingkungan sekitar dalam berkendara. Karena memiliki dampak langsung terhadap keselamatan saat berkendara di jalan raya, beberapa upaya telah dilakukan untuk mempelajari *security perception system* berbasis LiDAR dalam pengaturan AV yang belum dijelajahi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Yulong Cao, dkk yang berjudul “*Adversarial Sensor Attack on LiDAR-based Perception in Autonomous Driving*” memperhitungkan penyebaran *spoofing* LiDAR (pemberian data palsu yang mengganggu deteksi LiDAR) sebagai model analisis situasi dan menetapkan tujuan penyelesaiannya sebagai *obstacle spoofing* yang dekat dengan bagian depan AV. Mereka menemukan bahwa menerapkan *spoofing* LiDAR tidak cukup untuk mencapai tujuan karena proses deteksi objek berbasis *Machine Learning* (Algoritma *Machine Learning* dapat mendeteksi anomali yang terjadi pada data LiDAR). Oleh karena itu, mereka mengeksplorasi kemungkinan untuk mengendalikan upaya *spoofing* secara strategis untuk memanipulasi model *machine learning*. Mereka merumuskan tersebut sebagai masalah optimasi dan merancang metode penentuan model untuk fungsi interferensi *input* dan fungsi objektif serta mengidentifikasi keterbatasan yang melekat pada penyelesaian masalah secara langsung menggunakan optimasi dan merancang algoritma yang menggabungkan optimasi dan pengambilan sampel global, yang meningkatkan tingkat keberhasilan serangan menjadi sekitar 75%. Sebagai studi kasus untuk memberikan penjelasan dari dampak serangan *spoofing* pada level keamanan AV, mereka membangun dan mengevaluasi dua skenario serangan yang dapat mengganggu gerak dan keamanan perjalanan. dalam penelitian tersebut juga membahas langkah pertahanan dalam sistem AV, sensor dan model *machine learning*. (Cao et al., 2019)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Hanno Holzhüter, dkk dengan judul “*Technical concepts of automotive LiDAR sensors: a review*” menyatakan bahwa Sensor LiDAR pada otomotif merupakan salah satu teknologi penting dalam pengembangan fitur otonom tingkat tinggi pada kendaraan. Berbagai konsep desain sensor LiDAR dapat ditemukan di industri dan telah banyak digunakan saat ini. Meskipun terus berkembang, berbagai desain sensor LiDAR masih dikejar oleh berbagai perusahaan. Konstruksi ruang desain LiDAR otomotif membantu memvisualisasikan yang diilustrasikan dengan gambar dari aplikasi paten yang telah diterbitkan yang berfokus pada mekanisme pemindaian dan pola pemindaian. Ini digunakan sebagai referensi dalam mengidentifikasi pendekatan terbaik dalam

pengemudi otonom. Pengembangan sensor LiDAR yang terus-menerus menjadi kunci keamanan dan keandalan dalam sistem otonom. Eksplorasi konsep dan analisis paten memberikan wawasan tentang inovasi terbaru dalam teknologi LiDAR otomotif, berkontribusi pada kesuksesan kendaraan otonom di masa depan. (Holzhüter et al., 2023)

Pengembangan teknologi pendeteksian objek berbasis LiDAR 3D telah menjadi fokus utama dalam perkembangan kendaraan listrik otonom. Sebagai contoh, BRIN juga telah mengambil langkah serupa dengan merancang kendaraan listrik otonom roda tiga, dengan berpenumpang satu orang, dan beroperasi dalam area lingkungan terbatas. Dalam upaya ini, mereka berhasil menciptakan sistem pendeteksian objek berdasarkan teknologi LiDAR 3D yang dapat merekonstruksi lingkungan sekitar dan mengidentifikasi posisi objek serta memberikan informasi lokasi berupa jarak dengan akurat.

Namun, meskipun pencapaian ini cukup signifikan, penerapan teknologi tersebut belum mencakup aspek keselamatan dan panduan aktif. Dengan kata lain, sistem tersebut belum dapat secara otomatis mengontrol kecepatan kendaraan, melakukan pengereman, atau mengarahkan kemudi sebagai tanggapan terhadap objek yang terdeteksi.

Dalam rangka memanfaatkan potensi teknologi LiDAR 3D yang telah ada, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem yang memiliki kemampuan untuk mengintegrasikan informasi dari pendeteksian objek LiDAR 3D ke dalam tindakan yang lebih luas, seperti mengatur kecepatan kendaraan, melakukan pengereman, dan mengendalikan arah kemudi secara otomatis. Dengan sistem ini, kendaraan listrik otonom akan dapat melakukan manuver untuk menghindari objek yang berada pada area yang telah ditentukan.

Metode fuzzy Mamdani digunakan sebagai pendekatan untuk melakukan verifikasi *output* berupa keputusan dalam melakukan manuver penghindaran (*evasion maneuver*) yang dihasilkan berdasarkan *input* lokasi objek terhadap sumbu 0 derajat dari sensor LiDAR. Dengan menggunakan metode fuzzy Mamdani, hasil dari pengujian yang telah dilakukan dapat diuji kebenaran dan efektivitasnya dalam menentukan keputusan saat melakukan manuver. ini bertujuan untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi kendaraan otonom dalam situasi yang melibatkan manuver menghindar.

LiDAR (*Light Detection and Ranging*) adalah perangkat yang sering digunakan untuk aplikasi pendeteksian objek (target), menentukan jarak antara target dan sensor (*range*), dan mengukur sifat fisik lebih lanjut dari permukaan target tersebut. Dengan menggunakan pulsa-pulsa sinar laser, perangkat LiDAR bahkan tidak hanya mendeteksi objek, tetapi juga dapat mengetahui posisi objek tersebut dengan

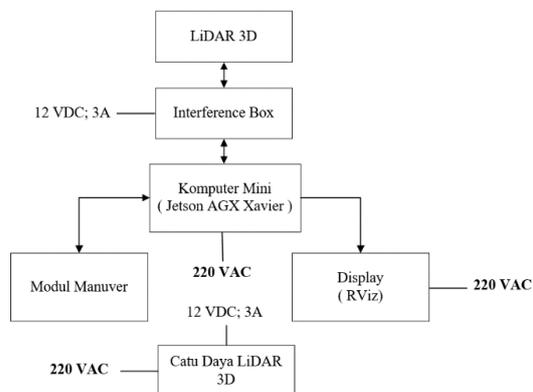
akurasi yang sangat baik. Di zaman modern seperti sekarang, LiDAR dapat diaplikasikan untuk membantu survei, pengukuran, atau pengamatan yang menggunakan teknik atau metode penginderaan jauh (*remote sensing*), sistem penginderaan pada pesawat atau *drone*, robot, *autonomous vehicles*, kendaraan militer, dan lain-lain. (Nugraha et al., 2021)

Perangkat LiDAR saat ini banyak ditemukan dipasaran, sehingga tidak sulit memanfaatkan LiDAR untuk berbagai aplikasi. Namun demikian *software* aplikasi pembacaan data LiDAR atau data hasil deteksi objek tidak diberikan secara penuh oleh produsen, jika ada pun harganya cukup mahal dan terbatas pada aplikasi tertentu. Sehingga untuk dapat dimanfaatkan lebih lanjut masih perlu pengembangan *software* sesuai dengan kebutuhan aplikasinya. Salah satu bentuk pengembangan *software* yang dapat terus dikembangkan adalah pembacaan dan visualisasi data LiDAR. Dalam penelitian ini akan dikembangkan *software* pembacaan, visualisasi data LiDAR dan pengaplikasian pada rem, *steer* dan traksi mobil listrik otonom roda tiga.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Hardware dan Implementasi

Konfigurasi *hardware* yang ditunjukkan pada Gambar 1, merupakan susunan *hardware* yang terdiri atas LiDAR 3D, *interference box*, Komputer mini Jetson AGX Xavier, modul manuver, *Display* (RViz), dan catu daya LiDAR 3D.



Gambar 1. Konfigurasi *Hardware* Sistem Manuver Otomatis

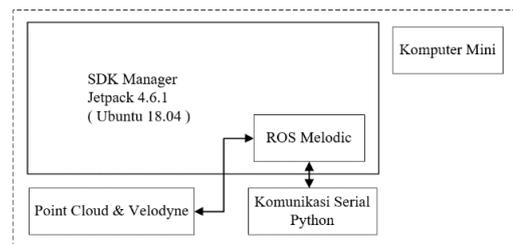
Sistem LiDAR mampu melakukan pemindaian pada area 360° (horizontal) dan 30° (vertikal). Dalam penelitian ini menggunakan LiDAR 3D Velodyne Puck VLP 16 yang memiliki kecepatan putaran 600 rpm hingga 900 rpm dan tiap putarannya diperoleh 28.500 *point cloud*. (Lassiter et al., 2020) Data yang diperoleh dari LiDAR 3D dikirimkan menuju komputer mini melalui transmisi Ethernet agar selanjutnya dapat dianalisis untuk keperluan manuver. Data yang diperoleh dari LiDAR memiliki informasi jarak dan sudut dari tiap *point cloud* dalam area horizontal 360° dan vertikal 30°. LiDAR 3D memerlukan tegangan kerja 12

VDC 3 A, dan daya yang dibutuhkan oleh komputer mini adalah 65W, dengan tegangan sebesar 19VDC dan arus 3,42 A.

Visualisasi objek LiDAR 3D merupakan langkah penting dalam pemantauan dan navigasi kendaraan otonom atau sistem lain yang memanfaatkan sensor tersebut. Informasi objek yang terdeteksi akan ditampilkan pada *display* (RViz) yang terhubung dengan komputer mini. *Display* (RViz) memiliki resolusi VGA (*Video Graphics Adapter*) yang cukup untuk visualisasi data LiDAR dalam tampilan 3D yang informatif. Hal ini sangat berguna dalam pengembangan teknologi otonom, pemetaan, dan navigasi yang mengandalkan data LiDAR untuk beroperasi dengan aman dan efisien. Dengan *Display* (RViz) yang terhubung ke komputer mini, sistem tersebut dapat mengolah dan menampilkan informasi yang diperlukan untuk mengambil keputusan yang cerdas dan aman dalam berbagai situasi.

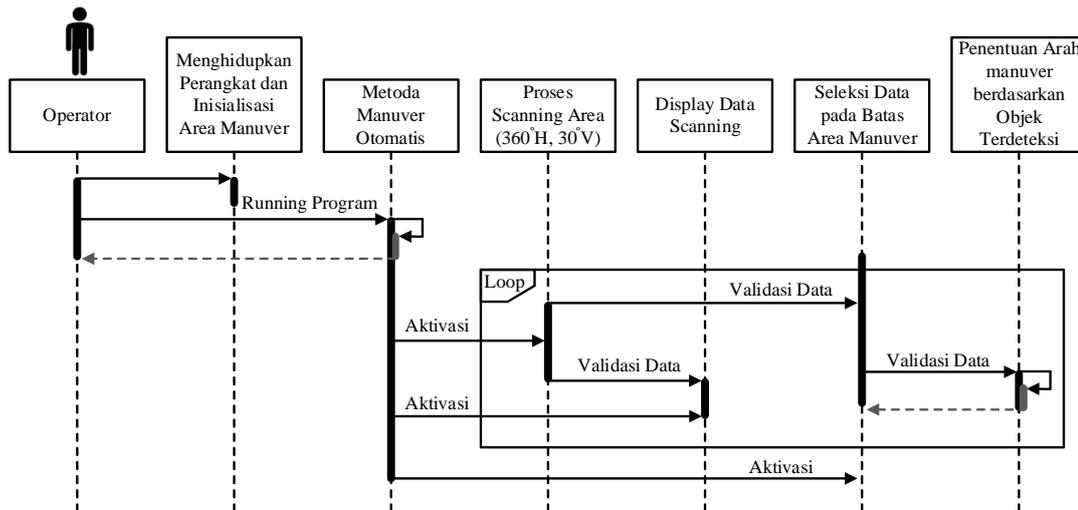
Sinyal-sinyal perintah manuver dikirimkan oleh komputer mini ke modul manuver melalui komunikasi serial berdasarkan data yang telah dikirimkan oleh sensor LiDAR 3D dan berfungsi sebagai pengendali sistem manuver. Modul manuver ini diberi tegangan kerja 12 VDC. Modul manuver memperoleh sinyal *input* dari komputer mini, jika sinyal manuver berupa rem maka merefleksikan rem, jika sinyal manuver berupa kendali kemudi maka akan digunakan untuk mengendalikan arah kemudi, dan jika sinyal manuver berupa gerak roda maju atau mundur maka akan digunakan untuk mengendalikan kendali gerak roda.

2.2. Desain Software Manuver



Gambar 2. Konfigurasi *software* manuver

Pada tahap desain *software* memerlukan *hardware* komputer mini yang dipasang Jetpack 4.6.1 (Ubuntu 18.04) dan ROS (*Robot Operating System*) Melodic yang dapat membantu penyimpanan serta pemrosesan data *point cloud* dari LiDAR 3D ke *display* Rviz. Hubungan antara *hardware* dan *software* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Dalam melakukan proses akuisisi data *point cloud* menggunakan bahasa pemrograman Python, karena memiliki struktur data yang sederhana serta *keyword* yang lebih ringkas, serta mudah diaplikasikan karena penulisan sintaks yang lebih sederhana dibandingkan dengan bahasa pemrograman lain sehingga sangat cocok untuk pengembangan *software* dalam bentuk yang sederhana. (Nugraha et al., 2021)



Gambar 3. Diagram Sequence

Untuk memproses algoritma manuver menggunakan python, terdapat beberapa tahap yang perlu dilakukan, yaitu:

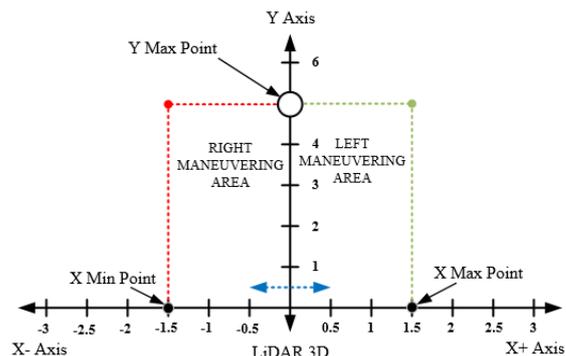
1. Menghidupkan perangkat dan inisialisasi batas area manuver.
2. Aktivasi *Library* pada algoritma manuver yang digunakan, diantaranya:
 - *point cloud* dan *Velodyne*
 - *ROS melodic (Rviz)*
 - *Serial Komunikasi Mini Komputer dengan Modul Manuver*
3. Melakukan proses *scanning* area ($360^{\circ}H$, $30^{\circ}V$) sehingga diperoleh data *point cloud* dari LiDAR 3D berupa objek sekeliling LiDAR 3D ($360^{\circ}H$, $30^{\circ}V$).
4. Melakukan Visualisasi data berupa Display berdasarkan hasil *scanning* dari LiDAR 3D.
5. Melakukan seleksi data pada batas area manuver.
6. Melakukan penentuan arah manuver berdasarkan data terhadap objek terdeteksi.

Proses berjalannya algoritma manuver dalam kendaraan listrik otonom roda tiga ditunjukkan pada Gambar 3. Diagram ini mengilustrasikan integrasi perangkat lunak yang melibatkan kerja rem, kemudi, dan traksi berdasarkan data dari sensor LiDAR 3D. Pada diagram ini, terdapat *fragment loop* yang menunjukkan pemrosesan dan tanggapan dari LiDAR 3D Untuk mengambil keputusan manuver. Dengan kata lain, kendaraan secara terus-menerus mengikuti algoritma manuver yang melibatkan operasi rem, kemudi, dan traksi berdasarkan informasi dari sensor LiDAR 3D secara langsung.

2.3. Maneuvering Area Distance Map

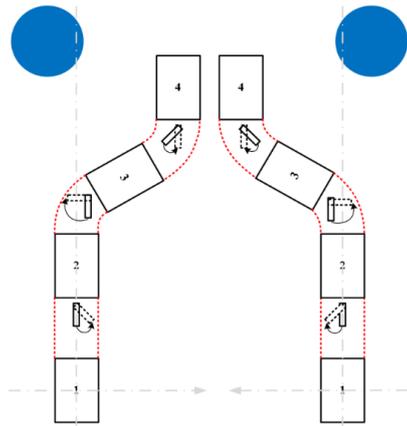
Penentuan area manuver dalam representasi data melibatkan penetapan nilai minimum dan maksimum pada sumbu x serta nilai maksimum pada sumbu y untuk memberikan informasi visual mengenai jarak deteksi sensor LiDAR. Penetapan data ini berfungsi sebagai pemfilteran data, sehingga hanya data dalam area tersebut dapat

dipertahankan. Informasi tersebut digunakan dalam sistem manuver kendaraan listrik otonom roda tiga untuk identifikasi serta membuat keputusan untuk pengereman dan manuver penghindaran objek.



Gambar 4. Area manuver

Dalam manuver kendaraan listrik roda tiga, penentuan area manuver merupakan kunci untuk keamanan dan efisiensi manuver menghindari objek di jalur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem manuver telah diterapkan pada kendaraan ini sehingga kendaraan dapat secara otomatis melakukan manuver untuk menghindari objek yang berada dalam jarak minimal 5 meter di depannya, dengan posisi keberadaan objek tersebut tidak lebih besar dari 2 meter di sebelah kiri atau kanan kendaraan. Dalam kata lain, area manuver dibatasi oleh $\{-W/2 - C\} \leq X \leq \{W/2 + C\}$; $X \in \text{real}$; C adalah tepi bebas = 1.5} dan $\{0 \leq Y \leq V$; $V \in \text{real}$; $V = 5\}$, dengan lebar kendaraan listrik W (meter) dan posisi mulai pengereman V (meter). keputusan arah manuver berdasarkan letak objek yang terdeteksi, adalah $\{0 < X < X \text{ Max}$; $X \in \text{real}\}$ jika objek berada di sebelah kanan, atau $\{X \text{ Min} < X < 0$; $X \in \text{real}\}$ di sebelah kiri. Hal ini memastikan kendaraan bergerak dengan aman dan efisien dalam menghindari rintangan di jalurnya.



Gambar 5. Path Map Kanan dan Kiri

Untuk menentukan arah manuver, objek data yang terdeteksi oleh sensor LiDAR 3D adalah faktor kunci yang memandu pengambilan keputusan. Objek yang terdeteksi memberikan informasi penting untuk merencanakan jalur manuver yang aman dan efisien. Path map pada Gambar 5 merupakan representasi visual dari jalur manuver mobil listrik otonom roda tiga, dalam mempertimbangkan data objek yang terdeteksi dengan mobil listrik otonom roda tiga sebagai perencanaan jalur penghindaran, upaya dalam memastikan keamanan dan efisiensi perjalanan serta mengatasi penentuan arah manuver yang kurang objektif atau kurang luas dikarenakan hanya melihat dari posisi objek saja dilakukan melalui Aturan yang dihitung secara praktis untuk fuzzy pada objek yang berjarak antara -2 sampai -0,8 dan -0,8 sampai 2 meter dan jarak kendaraan terhadap objek didasarkan tabel pengujian yang dilakukan sehingga kendaraan dapat mengambil keputusan secara *real-time* dan mengikuti jalur yang telah direncanakan dengan mempertimbangkan objek-objek di sekitarnya. Modul *software* dan *hardware* untuk sistem manuver yang diintegrasikan dengan kendaraan listrik roda tiga yang terdiri dari sistem pengendali gerak roda depan, sistem pengendali rem dan sistem pengendali kemudi pada roda belakang yang bergerak 25° ke arah kiri atau kanan dari kendaraan listrik otonom roda tiga.

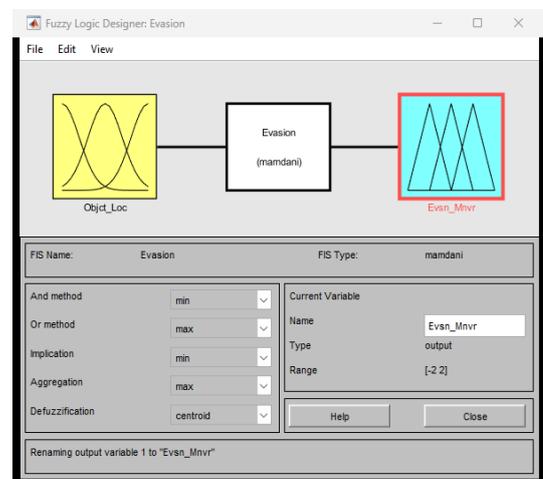
2.4. Model Logika Fuzzy

Model pada logika fuzzy ini menggunakan aturan Mamdani dan penghindaran mobil terhadap objek dipertimbangkan. Dalam menentukan keputusan manuver penghindaran Metode defuzzifikasi sebagai centroid digunakan untuk menentukan nilai keanggotaan berdasarkan jarak objek. nilai jarak pada sumbu x menjadi *input* utama dari objek, sedangkan nilai manuver penghindaran menjadi output yang dihasilkan. Jarak objek diukur dalam rentang -2 hingga 2 meter mewakili rasio jarak pada objek dan sinyal yang dikirim ke pengontrol. Ketika objek terdeteksi pada jarak -2 hingga 2 meter, sistem akan menentukan keputusan

manuver secara otomatis sehingga dapat diverifikasi kebenaran dalam mengambil keputusan.

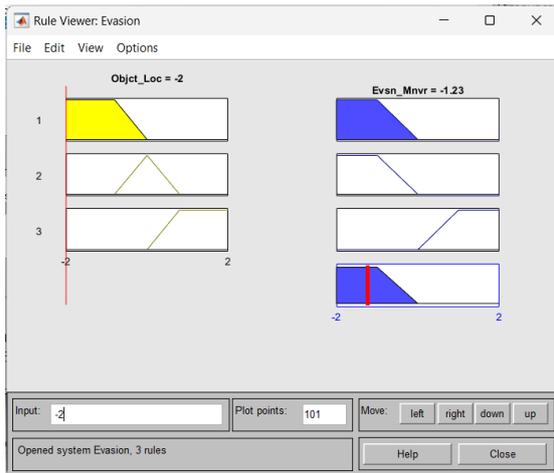
3. HASIL DAN ANALISIS

Keandalan deteksi rintangan dari sistem LiDAR didasarkan pada kemampuannya untuk mendeteksi rintangan, akurasi jarak yang terdeteksi dari rintangan dan klasifikasi yang tepat dari hasil seleksi data merupakan tujuan utama pada penelitian ini. Pengujian dalam ruangan laboratorium uji Brin KST Samaun Samadikun dilakukan menggunakan sampel rintangan berupa objek manusia dan ditempatkan pada jarak yang bervariasi di depan kendaraan listrik otonom roda tiga, serta sistem fuzzy digunakan sebagai alat verifikasi untuk memutuskan langkah-langkah manuver dalam pengujian sistem terhadap objek. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengamati dan mengevaluasi performa modul manuver dalam situasi yang mirip dengan penggunaan sehari-hari pada wilayah terbatas. Pengujian ini melibatkan penggunaan modul manuver dalam situasi kehidupan nyata untuk menilai keandalan, kestabilan, dan responsivitas sistem tersebut, mobil listrik otonom roda tiga yang telah dilengkapi dengan modul manuver tersebut diuji dalam kondisi nyata di jalan raya atau area pengujian yang sesuai.

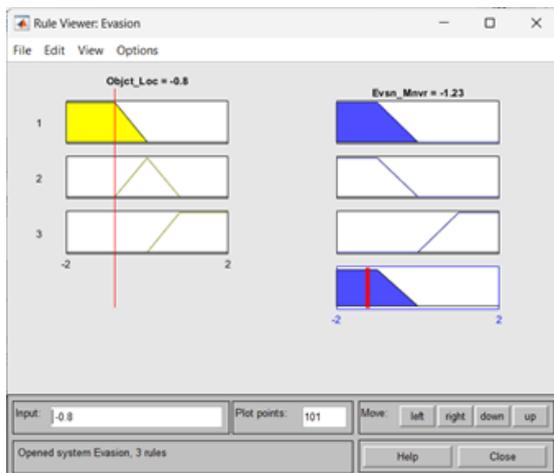


Gambar 6. Fuzzy Inference Model

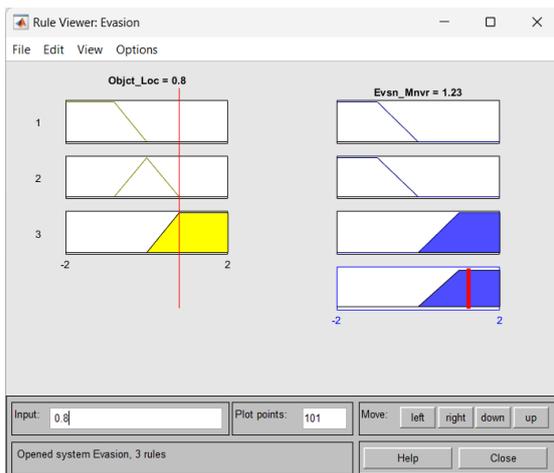
Object location adalah variabel *input* yang menjadi parameter utama dan akan diproses melalui sistem inferensi fuzzy lalu menjadi variabel *output* yang diinginkan. dalam hal nilai posisi objek dan Nilai manuver penghindaran ini divalidasi dari hasil inferensi. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk posisi objek adalah dalam tiga variabel yaitu area kiri, area ambigu dan area kanan serta fungsi keanggotaannya dirumuskan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Fuzzy Rules Area Kiri

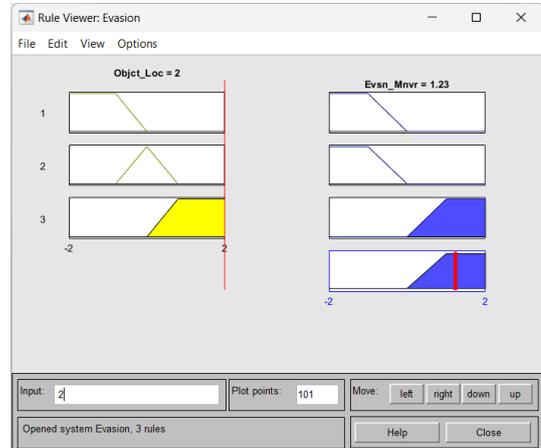


Gambar 8. Fuzzy Rules at Right Area



Gambar 9. Fuzzy Rules Area Kanan

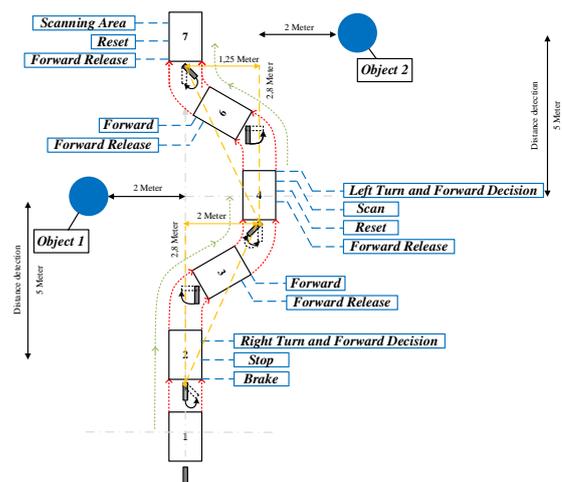
keanggotaan seperti kanan, ambigu dan kiri dengan rentang $((-2)-(0))$, $((-0.8) - (-0,8))$ dan $(0-2)$. Juga variabel output, tiga fungsi keanggotaan yaitu throttle ringan, throttle sedang dan throttle tinggi digunakan dengan rentang $((-2)-0)$ dan $(0-2)$.



Gambar 10. Fuzzy Rules Area Kanan

3.1 Implementasi Metode Manuver

Pada pengujian yang dilakukan, jarak diatur sesuai dengan Tabel 1. dan dilakukan pengukuran aktual terhadap dua objek dengan menggunakan alat ukur konvensional. Pengujian ini melibatkan pemakaian body dimana performansi dari pengujian yang sudah dilakukan dapat dilihat pada *Roadmap* Pengujian yang ditampilkan pada Gambar 10. sehingga memberikan representasi visual mengenai konfigurasi dan posisi objek-objek yang terukur menggunakan sensor LiDAR 3D. Pada Tabel 2. menunjukan tahapan yang dilakukan mobil listrik otonom roda tiga dalam melakukan pengindraan terhadap objek terdeteksi.



Gambar 10. Road Map

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Fungsi trapesium (trapmf) digunakan untuk variabel *output* untuk memfasilitasi nilai *output* dan kemudian penghasil keputusan penghindaran. Kisaran dari (-2) sampai dengan (2) untuk nilai yang diberikan pada posisi objek yang dipilih untuk model. Untuk posisi objek, tiga variabel digunakan sebagai fungsi

Tabel 1. Tabel Pengujian

Objek	Jarak		Keterangan
	X	Y	
1.	-2 m	7 m	Pada sumbu X jarak dinyatakan terhadap 0° sensor LiDAR 3D sedangkan sumbu Y dinyatakan terhadap mobil
2.	2 m	14 m	

Tabel 2 Display Pengujian

No	Display Pengujian	Keterangan
1		Ini menunjukkan jarak antara objek terhadap mobil berdasarkan nilai yang sudah ditentukan pada Tabel 1 yaitu jarak objek pertama terhadap mobil pada sumbu y adalah 7 meter, sedangkan pada sumbu x terhadap sumbu 0° Sensor LiDAR 3D berada pada posisi -0.8 meter.
2		Selanjutnya mobil bergerak maju hingga sensor LiDAR 3D mendeteksi Objek pada area yang sudah ditentukan yaitu pada area $\{0 < Y < V; V \in \text{real}; V = 5\}$ dan $\{X_{\text{Min}} < X < 0; X \in \text{real}\}$ dan mobil melakukan pengereman
3		Mobil melakukan manuver kearah kanan.
4		Manuver penghindaran objek pertama telah selesai dilakukan, kendaraan kembali ke posisi <i>scanning</i> . Selanjutnya mobil kembali melakukan <i>scanning</i> area untuk mendeteksi adanya objek pada area yang ditentukan.
5		Mobil bergerak maju hingga objek 2 terdeteksi oleh sensor LiDAR 3D pada jarak 2 Meter dalam area $\{0 < Y < V; V \in \text{real}; V = 5\}$ dan $\{0 < X < X_{\text{Max}}; X \in \text{real}\}$.
6		Mobil melakukan manuver ke arah kiri.
7		Setelah skenario selesai dilakukan, sensor LiDAR 3D Kembali melakukan <i>scanning</i> apakah terdapat objek pada $\{0 < X < X_{\text{Max}}; X \in \text{real}\}$ di sebelah kanan, atau $\{X_{\text{Min}} < X < 0; X \in \text{real}\}$ di sebelah kiri.

3.2 Verifikasi Keputusan

Pengujian dilakukan dengan memanfaatkan nilai posisi objek sebagai *input* variabel tunggal, merepresentasikan jarak objek pada sumbu x di

depan kendaraan, dan menghasilkan output variabel tunggal yang menunjukkan arah manuver yang direkomendasikan. Fungsi keanggotaan fuzzy diterapkan untuk mendefinisikan derajat keanggotaan nilai posisi objek ke kategori fuzzy

"kanan," "ambigu," dan "kiri", pada sampel data pengujian yang dilakukan nilai -2m pada sumbu x terhadap mobil termasuk ke dalam keanggotaan kiri dan nilai 2m termasuk kedalam keanggotaan kanan. Aturan fuzzy yang terdefinisi dengan baik menghubungkan nilai input fuzzy dengan output fuzzy "kanan" dengan nilai linguistik interval (-2)-0 m dan "kiri." dengan nilai linguistik interval 0-2 m, Agregasi dan defuzzifikasi menggunakan *method of centroid* diterapkan untuk menggabungkan hasil dari aturan yang dan menghasilkan arah manuver yang dinyatakan sebagai nilai *crisp*. Hasil pengujian menggunakan *toolbox* MATLAB ditampilkan pada Gambar 7 dengan input -2 dan menghasilkan nilai *crisp* -1,23 yang termasuk pada keanggotaan *output* kanan dan Gambar 10. *input* nilai yang digunakan 2 menghasilkan nilai *crisp* 1,23 yang termasuk derajat keanggotaan kiri. Pendekatan fuzzy ini memberikan hasil verifikasi kebenaran terhadap keputusan penghindaran dan pengujian ini memberikan wawasan penting untuk mengembangkan dan memperbaiki sistem guna meningkatkan keselamatan dan kinerja kendaraan otonom dalam menghadapi objek-objek yang bergerak di sekitarnya.

4. KESIMPULAN

Analisis ini merupakan bagian dari evaluasi kinerja dan keandalan sistem dalam mengenali dan merespons situasi lalu lintas di sekitar kendaraan otonom. Dalam konteks pengembangan mobil listrik otonom roda tiga, pengenalan dan interpretasi informasi dari sensor LiDAR 3D dan sistem deteksi lainnya menjadi kritis dalam mengambil keputusan yang aman dan tepat. Dalam situasi nyata, mobil listrik otonom harus mampu mengenali objek-objek di sekitarnya dan mengklasifikasikannya sebagai objek yang dapat dihindari atau tidak, serta memilih manuver yang sesuai untuk menghindari tabrakan atau bergerak dengan aman. Dalam kasus ini, pengujian tersebut menguji apakah sistem dapat mengenali posisi relatif objek terhadap kendaraan dan mengambil keputusan belok kiri atau belok kanan secara tepat berdasarkan data sensor dan algoritma pengolahan informasi yang telah diimplementasikan. Dengan menguji dan membuktikan bahwa sistem dapat mengambil keputusan yang konsisten dengan posisi objek relatif terhadap sumbu X, hal ini membuktikan bahwa sistem memiliki tingkat keakuratan dan keandalan yang memadai dalam situasi pengambilan keputusan yang sederhana dan penting untuk keselamatan berlalu lintas.

Sistem manuver untuk mobil listrik otonom roda tiga telah direalisasikan dengan menggunakan komputer mini Jetson AGX Xavier sebagai tempat kerja algoritma manuver, dan mikrokontroler Teensy 4.1 sebagai tempat kerja pemroses instruksi manuver sistem manuver yang terdiri dari modul *software* dan *hardware* sistem manuver ini diintegrasikan dengan

sistem pengendali gerak roda depan (2 buah) untuk mengatur percepatan dan perlambatan, sistem pengendali rem untuk pengereman dan sistem pengendali kemudi pada roda belakang (1 buah) dari kendaraan listrik roda tiga yang telah diterapkan pada kendaraan listrik roda 3 sehingga kendaraan tersebut mampu melakukan manuver menghindari objek yang berada pada area minimum 5 meter di depannya, dengan posisi keberadaannya tidak lebih besar dari 2 Meter disamping kiri atau kanannya. Dengan kata lain area manuver adalah $\{-W/2 - C\} \leq X \leq (W/2 + C)$; $X \in \text{real}$; C adalah tepi bebas = 1.5} dan $\{0 \leq Y \leq V$; $V \in \text{real}$; $V = 5\}$, dengan lebar kendaraan listrik W(meter) dan posisi mulai pengereman V(meter). Sedangkan keputusan arah manuver berdasarkan letak objek yang terdeteksi, adalah $\{0 < X < X \text{ Max}$; $X \in \text{real}\}$ jika objek berada di sebelah kanan, atau $\{X \text{ Min} < X < 0$; $X \in \text{real}\}$ di sebelah kiri.

DAFTAR PUSTAKA

- CAO, Y., ZHOU, Y., CHEN, Q.A., XIAO, C., PARK, W., FU, K., CYR, B., RAMPAZZI, S., MORLEY MAO, Z., 2019. Adversarial sensor attack on LiDAR-based perception in autonomous driving, Association for Computing Machinery, pp. 2267–2281. <https://doi.org/10.1145/3319535.3339815>
- HOLZHÜTER, H., BÖDEWADT, J., BAYESTEH, S., ASCHINGER, A., BLUME, H., 2023. Technical concepts of automotive LiDAR sensors: a review. Optical Engineering62. <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.3.031213>
- LASSITER, H.A., WHITLEY, T., WILKINSON, B. AND ABD-ELRAHMAN, A., 2020. Scan Pattern Characterization of Velodyne VLP-16 Lidar Sensor for UAS Laser Scanning. *Sensors*, 20(24), p.7351. <https://doi.org/10.3390/s20247351>.
- NUGRAHA, R.A.S., ARIFIN, D.M., SATYAWAN, A.S., ASYSYAKUUR, M.I., NUFUS, N., SANTI, N.N.A.M., HABIBI, A., 2021. Pengembangan Software Aplikasi Pendeteksian Objek Berbasis LiDAR (Light Detection and Ranging). Prosiding Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia (SENASTINDO) 3, 73–82. <https://doi.org/10.54706/senastindo.v3.2021.120>
- SINGH, ANKIT & NEGI, ABHISEK & AZAD, SMAK & MUDALI, SANGRAM. (2017). Fuzzy Based Controller for Lidar Sensor of an Autonomous Vehicle. Energy Procedia. 117. 1160-1164. [10.1016/j.egypro.2017.05.241](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.241).