

INTEGRASI VISUAL COMPUTING UNTUK SISTEM PENGGEREMAN ADAPTIF ROBOT INSPEKSI REL OTONOM

R. A. M. F. Natadisastra¹⁾, Muhammad Mahirul Faiq²⁾, Annisa Nur Halifah³⁾, Adiratna Ciptaningrum^{4*)}, Mohammad Erik Echsony⁵⁾, R. Akbar Nur Apriyanto⁶⁾

¹Jurusan Teknik, Perkeretaapian, Politeknik Negeri Madiun

^{3,4,5,6}Jurusan Teknik, Teknologi Rekayasa Otomasi, Politeknik Negeri Madiun

E-mail: adiratna@pnm.ac.id *)

Abstract

The continuous operation of railway inspection systems over a 24-hour cycle necessitates the implementation of supporting technologies that can function optimally under all lighting conditions. This study develops an autonomous braking system powered by artificial intelligence and computer vision, incorporating Zero-DCE++ Night Vision enhancement, YOLOv8n object detection, and Human Pose Estimation on the LuminoLynx Inspection Robot. The system adopts a Stereo Vision triangulation approach for distance estimation and is integrated with an ESP32 microcontroller to enable real-time decision-making based on object proximity. Under low-light static testing, the system detected human objects with 100% accuracy, achieving the smallest distance error of 0.9 meters (3.37%) and a braking response within 3 seconds. For vehicle objects, the system yielded a confidence score of 0.62, a 3.61-meter error (36.1%), and a braking time of 6 seconds. These results confirm that integrating night vision and AI-based detection improves detection accuracy and braking responsiveness in low-light conditions. Although detection remained functional during dynamic testing, camera vibration reduced the precision of stereo matching, impacting distance estimation accuracy. Future improvements such as camera stabilization or depth sensor integration are recommended. This research contributes to advancing autonomous braking technology for nighttime railway inspections.

Keywords: *Night Vision Zero-DCE++, YOLOv8n, Human Pose Estimation, Stereo Vision, Autonomous Braking System.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *computer vision* telah membuka peluang besar dalam meningkatkan kualitas sistem transportasi cerdas di berbagai sektor, termasuk perkeretaapian. Di Indonesia, sistem perkeretaapian merupakan tulang punggung transportasi darat nasional yang terus berkembang, baik dari segi jaringan rel, volume penumpang, maupun pengangkutan barang. Berdasarkan data Kementerian Perhubungan (2024), total panjang rel aktif yang dikelola PT Kereta Api Indonesia (Persero) telah mencapai lebih dari 7.400 km, dengan intensitas lalu lintas yang tinggi terutama di koridor-koridor utama seperti lintas utara dan selatan Pulau Jawa. Kompleksitas jaringan dan tingginya intensitas lalu lintas memerlukan sistem inspeksi rel yang adaptif dan andal guna mencegah potensi gangguan teknis maupun kecelakaan fatal.

Dalam konteks infrastruktur tersebut, kereta inspeksi berperan penting sebagai sarana pemantauan kondisi jalur rel secara langsung. Namun, sistem inspeksi konvensional masih bergantung pada pengamatan manusia dan terbatas pada waktu tertentu. Untuk meningkatkan efektivitas inspeksi, telah dikembangkan teknologi berbasis *computer vision* untuk mendeteksi keberadaan objek atau potensi bahaya secara otomatis. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah penerapan model *You Only Look Once* versi 5 (YOLOv5), yang dikenal efisien dalam melakukan deteksi objek secara *real-time* pada kondisi siang hari (Li et al., 2024).

Meskipun demikian, tantangan utama tetap ada, yakni menurunnya akurasi deteksi pada malam hari atau dalam kondisi pencahayaan rendah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi antara YOLOv5s dengan *Human Pose Estimation* (HPE) dapat meningkatkan akurasi deteksi objek manusia dan kendaraan pada siang hari, tetapi tidak mampu memberikan hasil optimal saat malam hari (Ciptaningrum, 2023). Padahal, deteksi objek secara akurat merupakan komponen krusial dalam memicu sistem respon visual adaptif, yang memberikan sinyal peringatan dini kepada operator inspeksi. Fungsi utama sistem ini bukanlah untuk menggantikan sistem pengereman secara langsung, tetapi sebagai subsistem keselamatan berbasis visual yang mendeteksi potensi bahaya dan memberikan *early warning* untuk mendorong pengambilan keputusan cepat secara manual maupun semi-otomatis.

Untuk mengatasi kendala visibilitas tersebut, pendekatan *Low-Light Image Enhancement* (LLIE) berbasis algoritma *Zero-Reference Deep Curve Estimation* (Zero-DCE) dan pengembangannya yaitu Zero-DCE++. Teknologi ini bekerja dengan merekonstruksi pencahayaan citra secara adaptif tanpa memerlukan referensi pencahayaan, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi visual pada lingkungan minim cahaya (Guo et al., 2020). Di sisi lain, pengembangan model deteksi objek terbaru seperti YOLOv8 yang diperkuat dengan *Deformable Convolutional Networks* (DCN) telah menunjukkan performa unggul dengan *mean Average Precision* (mAP) mencapai 95,23% dan kecepatan deteksi 41,46 FPS, menjadikannya kandidat kuat untuk sistem pendeteksi objek *real-time* (Li et al., 2024).

Kondisi di lapangan juga memperkuat urgensi sistem pendukung keselamatan yang andal sepanjang waktu. Menurut G.N. Pamungkas, Kepala Unit Pelaksana Teknis Resor Jalan Rel 7.7 PT Kereta Api Indonesia (Persero) DAOP 7 Madiun, proses inspeksi dilakukan selama 2×24 jam penuh dan alat yang digunakan harus mampu beroperasi dalam berbagai medan dan kondisi cuaca, termasuk malam hari dan hujan (komunikasi pribadi, 14 Januari 2025). Ini menunjukkan bahwa sistem visual berbasis AI perlu dilengkapi kemampuan adaptif terhadap variasi lingkungan agar tetap dapat mengidentifikasi objek penting seperti manusia, kendaraan,

atau hewan yang menghalangi rel, dan memberikan sinyal visual sebagai dasar aktivasi subsistem pengereman atau intervensi manual, bukan sebagai sistem pengereman utama.

Berangkat dari permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem deteksi objek berbasis AI sebagai sistem respon visual adaptif untuk mendukung keselamatan pada kereta inspeksi. Sistem ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu modul Zero-DCE++ untuk peningkatan kualitas citra dalam kondisi pencahayaan rendah, *Human Pose Estimation* untuk pelacakan posisi dan gestur manusia, dan YOLOv8-DCN sebagai algoritma deteksi objek berakurasi tinggi.

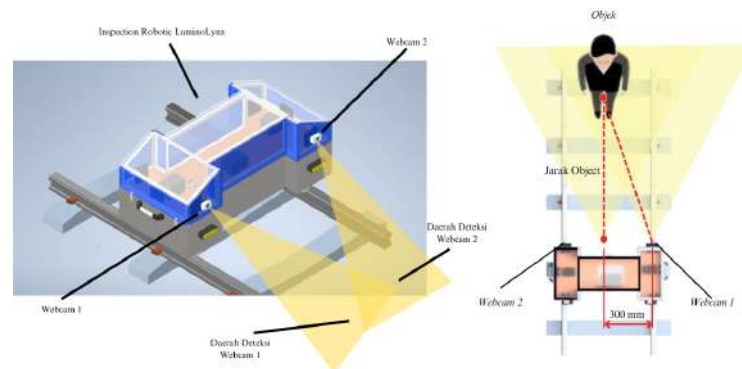
Kombinasi ketiga komponen tersebut dirancang untuk menghasilkan sinyal peringatan dini saat terdeteksi adanya objek kritis di jalur rel, yang selanjutnya dapat dijadikan acuan bagi operator untuk melakukan intervensi atau untuk mengaktifkan sistem pendukung lainnya. Sistem ini tidak bertujuan untuk langsung menginisiasi pengereman secara otomatis, melainkan sebagai bagian dari mekanisme keselamatan berbasis visual adaptif.

Dalam penelitian ini, peneliti mengembangkan sistem pendeteksi objek manusia dan kendaraan dengan memanfaatkan model *Night Vision Zero-DCE++* yang dioptimalkan untuk kondisi pencahayaan rendah. Sistem ini diintegrasikan ke dalam Robot Inspeksi LuminoLynx sebagai solusi teknologi guna meningkatkan keselamatan operasional inspeksi rel, khususnya pada malam hari atau lingkungan minim cahaya.

METODE PENELITIAN

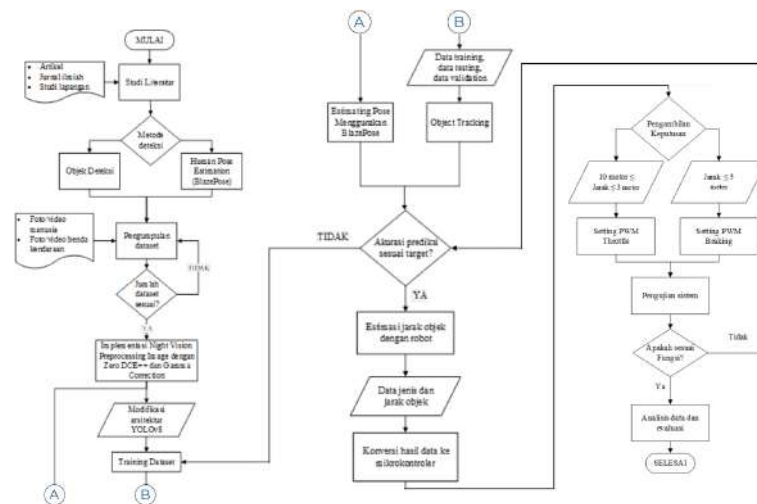
Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang berfokus pada pengembangan sistem deteksi visual dan respon adaptif berbasis *computer vision* untuk mendukung keselamatan operasi kereta inspeksi. Sistem ini dikembangkan sebagai perluasan dari studi sebelumnya dengan penambahan teknologi *Night Vision* berbasis Zero-DCE++ serta optimalisasi algoritma deteksi objek dari YOLOv5s menjadi YOLOv8 nano. Peningkatan ini dilakukan untuk memperoleh performa deteksi yang lebih tinggi, dengan hasil pengujian pada dataset internal menunjukkan kenaikan *mean Average Precision* (mAP) yang signifikan, serta efisiensi inferensi yang lebih baik. YOLOv8 nano juga menunjukkan konsumsi komputasi yang lebih rendah dan latensi pemrosesan yang lebih singkat dibandingkan YOLOv5s, menjadikannya lebih sesuai untuk diimplementasikan dalam sistem *real-time* berbasis *embedded vision* seperti pada platform Robot Inspeksi LuminoLynx. Selain itu, sistem ini mengintegrasikan algoritma *Human Pose Estimation* BlazePose untuk meningkatkan presisi klasifikasi objek manusia, sehingga memungkinkan sistem menghasilkan respon pengereman

adaptif berbasis kondisi lingkungan, bukan sebagai kontrol pengereman absolut, tetapi sebagai sinyal visual dan mekanik awal dalam mendukung pengambilan keputusan keselamatan.



Gambar 1. Layout Robot Inspeksi LuminoLynx

Sistem pengereman adaptif pada kondisi pencahayaan rendah dikembangkan dengan mengintegrasikan metode *Human Pose Estimation* BlazePose dan algoritma deteksi serta pelacakan objek YOLOv8 nano, yang dipadukan dengan model peningkatan citra Zero-DCE++. Kombinasi ini bertujuan untuk meningkatkan kapabilitas deteksi objek secara *real-time* dalam lingkungan dengan pencahayaan di bawah 200 lux. Untuk memperkirakan jarak antara robot inspeksi dan objek yang terdeteksi, baik manusia maupun kendaraan, kemudian diterapkan pendekatan *Stereo Vision* berbasis *triangulation disparity*, yang memungkinkan perhitungan kedalaman spasial secara presisi dari dua citra paralel yang diambil oleh kamera stereo. Informasi estimasi jarak ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan sistem *Autonomous Braking* pada platform *Inspection Robot LuminoLynx*. Seluruh proses pengambilan keputusan difasilitasi melalui sistem integrasi komunikasi serial dengan baudrate 115200, yang memetakan hasil klasifikasi objek dan estimasi jarak ke dalam sembilan kondisi respon pengereman adaptif. Setiap kondisi dikonversikan menjadi kendali sudut pada motor servo dalam rentang 0° hingga 120° , serta pengaturan kecepatan motor DC *brushed* untuk mensimulasikan tingkat pengereman sesuai urgensi objek yang terdeteksi.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Pengujian sistem dilakukan secara statis dan dinamis di jalur lintasan rel Laboratorium Perkeretaapian Politeknik Negeri Madiun. Pengujian statis difokuskan pada analisis akurasi deteksi objek dan validasi estimasi jarak dalam berbagai tingkat pencahayaan, sedangkan pengujian dinamis dilakukan untuk mengevaluasi respon sistem terhadap objek bergerak, termasuk analisis kecepatan respon pengereman terhadap variasi kecepatan awal dan posisi objek. Data dari pengujian ini digunakan untuk mengukur kinerja sistem secara kuantitatif, termasuk mean error estimasi jarak, response time, dan efektivitas perubahan kecepatan motor DC setelah aktivasi pengereman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian statis pada objek manusia dan kendaraan dilakukan dalam kondisi *low light* dengan model *Night Vision Zero-DCE++* intensitas cahaya 159 lux dan suhu 29°C ini akan ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Pengujian Statis (a) Objek Manusia, (b) Objek Kendaraan

Pada Tabel 1 menunjukkan rata-rata hasil pengujian statis sistem deteksi objek manusia yang dilakukan pada lintasan uji kereta api di Politeknik Negeri Madiun Kampus 2, yang berlokasi pada koordinat *latitude* -7.6132158 dan *longitude* 111.5110832. Berdasarkan hasil

tersebut, performa optimal sistem terdeteksi pada jarak aktual 4 meter, dengan tingkat akurasi mencapai 100% dan estimasi jarak sebesar 4,09 meter. Selisih antara jarak aktual dan estimasi yaitu 0,09 meter, menghasilkan tingkat *error* sebesar 3,37%. Kondisi lingkungan saat pengujian berlangsung relatif konstan dengan intensitas cahaya sebesar 159 lux dan suhu udara sekitar 29°C.

Tabel 1
Rata-rata Hasil Pengujian Statis Objek Manusia

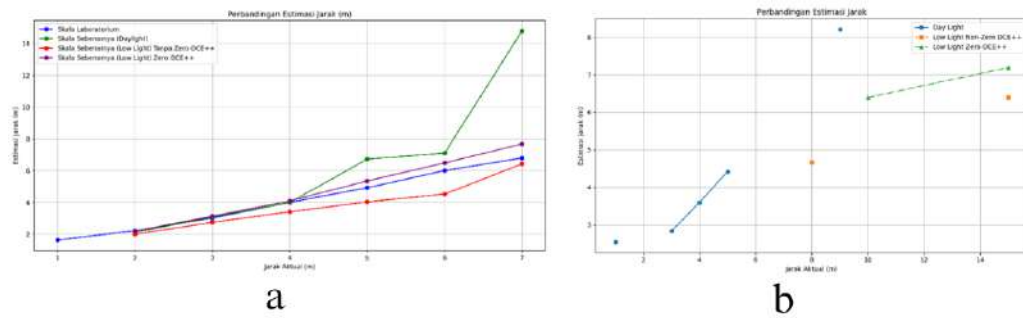
Jarak Aktual (m)	Akurasi (%)	Performa	Estimasi Jarak (m)	Error (%)	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (°C)
1	NaN	NaN	NaN	NaN	159	29
2	100	0.92	2.20	10.00	159	29
3	100	0.95	3.13	4.97	159	29
4	100	0.96	4.09	3.37	159	29
5	100	0.94	5.35	7.65	159	29
6	100	0.95	6.48	9.84	159	29
7	100	0.95	7.68	10.43	159	29

Tabel 2 merupakan rata-rata hasil pengujian statis objek kendaraan yang memiliki performa akurasi dan estimasi jarak deteksi pada jarak aktual 10 meter dengan *confidence score* 0,62 selisih 3,61 meter (*error* 36,1 %).

Tabel 2
Rata-rata Hasil Pengujian Statis Objek Kendaraan

Jarak Aktual (m)	Confidence Score	Estimasi Jarak (m)	Error (%)	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (°C)
1	Nan	Nan	Nan	159	29
2	Nan	Nan	Nan	159	29
3	Nan	Nan	Nan	159	29
4	Nan	Nan	Nan	159	29
10	0.62	6.39	36.1	159	29
15	0.35	7.19	52.06	159	29

Secara keseluruhan pengujian statis deteksi dan estimasi jarak objek manusia menghasilkan grafik perbandingan antara rata-rata estimasi jarak dan jarak aktual dengan berbagai kondisi. Dapat terlihat pada Gambar 5.(a) merupakan hasil sistem kondisi *low light* Zero-DCE++ (ungu) memiliki estimasi jarak objek manusia yang lebih dekat ke nilai aktual dibandingkan sistem tanpa Zero-DCE++ (hijau) yang cenderung *overestimation*. Sedangkan Gambar 5.(b) estimasi jarak objek kendaraan dengan Zero-DCE++ (hijau) lebih mendekati nilai jarak aktual dibandingkan sistem tanpa Zero-DCE++ (oranye).



Gambar 4. Grafik Perbandingan Rata-Rata Deteksi Estimasi Jarak Objek (a) Manusia, (b) Kendaraan

Pengujian dinamis pada objek manusia dan kendaraan dilakukan dalam kondisi *low light* dengan model *Night Vision Zero-DCE++* intensitas cahaya 93 lux dan suhu 28°C ini akan ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Pengujian Dinamis (a) Objek Manusia, (b) Objek Kendaraan

Gambar 6(a) menunjukkan mengenai posisi manusia yang semakin mendekat dari jarak terjauh diluar area kondisi yaitu 15 meter hingga 2 meter dengan keberhasilan sistem mengestimasi jarak perpindahan objek manusia yang berjalan secara *real-time*. Gambar 5(b) menunjukkan mengenai hasil pengujian dinamis objek kendaraan dengan skenario pengujian yang sama seperti objek manusia. Hasil parameter uji pada pengujian statis ini ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3
Parameter Hasil Pengujian Dinamis Objek Manusia

Waktu	Akurasi (%)	Performa	Estimasi Jarak (m)	Sudut Servo (°)	RPM	Kecepatan (Km/jam)	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (°C)
18:15:35	100	0.801327	6.387407	0	98	3.6	93	28
18:15:36	100	0.826794	4.790556	0	98	3.6	93	28
18:15:37	90.90	0.831967	3.592917	0	98	3.24	93	28
18:15:38	100	0.862556	3.079643	60	30	1.08	93	28
18:15:39	100	0.895757	2.73746	120	11	0.36	93	28
18:15:40	100	0.931067	2.463714	180	0	0	93	28

Tabel 3 dapat terlihat parameter hasil pengujian dinamis pada objek manusia dengan diketahui *pose* manusia terdeteksi terdekat 2.42 meter dengan keterangan sudut servo 180°. Pengereman terjadi ketika jarak objek terdeteksi 3,59 meter dengan respon sudut motor servo bertahap mulai 60° hingga 180° dalam 3 detik hingga kecepatan menjadi 0 km/jam.

Tabel 4
Parameter Hasil Pengujian Dinamis Objek Kendaraan

Waktu	<i>Confidence Score (%)</i>	Estimasi Jarak (m)	Sudut Servo (°)	RPM	Kecepatan (Km/jam)	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (°C)
20:09:30	0.37177336	2.92305085	0	31	1.08	93	28
20:09:31	0.37177336	2.92305085	0	31	1.08	93	28
20:09:32	0.37177336	2.92305085	0	37	1.44	93	28
20:09:37	0.37177336	2.92305085	150	103	3.6	93	28
20:09:38	0.37177336	2.92305085	180	0	0	93	28

Tabel 4 menunjukkan parameter hasil pengujian statis pada objek kendaraan terdeteksi stabil 2,92 meter. Pengereman terjadi ketika jarak terdeteksi 2,9 meter dari kecepatan 1,44 km/jam dengan ditandai respon sudut motor servo 150° dan 180° dalam 6 detik hingga kecepatan menjadi 0 km/jam.

Hasil penelitian yang telah didapatkan menunjukkan adanya perbedaan kinerja deteksi antara objek manusia dan kendaraan. Kinerja deteksi kendaraan lebih rendah dikarenakan dataset latih YOLOv8n yang kurang bervariasi dalam aspek ukuran, posisi dan orientasi objek sehingga mempengaruhi sistem deteksi bekerja secara *real-time* dimana ketika kendaraan melaju dengan objek berada di depan, maka semakin mendekati objek semakin besar pula ukuran objek pada *captured frame*. Hal ini juga mengakibatkan sistem sulit mengestimasi jarak yang mempengaruhi respon waktu dan kecepatan untuk melakukan pengereman. Selain itu, konsep *stereo vision* yang digunakan memiliki toleransi *pixel correspondence* yang rentan terhadap getaran dan bisa mengakibatkan pergeseran *disparity* sehingga terjadi *error* dalam estimasi jarak. Pergeseran *disparity* 1-2 pixel dapat mengakibatkan deviasi estimasi jarak yang cukup signifikan.

SIMPULAN

Integrasi teknologi *Night Vision*, *Human Pose Estimation*, dan YOLOv8n secara keseluruhan meningkatkan kinerja sistem *Autonomous Braking* dalam mendukung

keselamatan inspeksi rel di malam hari. Pada pengujian objek manusia menunjukkan akurasi 100% dengan error estimasi jarak terkecil sebesar 0,9 meter (3,37%) dan respon pengereman 3 detik. Sementara pada objek kendaraan menunjukkan *confidence score* 0,62 selisih 3,61 meter (*error* 36,1 %) dan respon pengereman 6 detik. Penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut, seperti peningkatan stabilisasi kamera atau penggunaan *depth sensor* tambahan guna mengoptimalkan deteksi dalam kondisi bergerak.

DAFTAR PUSTAKA

- Ciptaningrum, A. (2023). Design of smart human following on rail inspection using human pose estimation marker-less motion capture based on blazepose. *Journal Geuthee of Engineering and Energy (JOGE)*, 2(2), 106–118.
<https://doi.org/10.52626/joge.v2i2.26>
- Guo, C., Li, C., Guo, J., Loy, C. C., Hou, J., Kwong, S., & Cong, R. (2020). Zero-Reference Deep Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1777–1786.
<https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00185>
- Lei, S., Yi, H., & Sarmiento, J. S. (2024). Synchronous End-to-End Vehicle Pedestrian Detection Algorithm Based on Improved YOLOv8 in Complex Scenarios. *Sensors*, 24(18), 6116. <https://doi.org/10.3390/s24186116>
- Li, J., Durazo-Cardenas, I., Ruiz-Carcel, C., He, F., Anderson, R., Hall, A., Burbridge, D., & Starr, A. (2024). Smart railways: The design and construction of an autonomous inspection and maintenance vehicle. *Procedia CIRP*, 128, 61–65.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.003>