

**IMPLEMENTASI SISTEM DETEKSI OBJEK BERBASIS KAMERA 360
DERAJAT DAN 3D *LIDAR* PADA *HUSKY A200***



SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik
pada Program Studi Teknik Komputer

Oleh:
Jezzy Putra Munggaran
2106300

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KOMPUTER
KAMPUS UPI DI CIBIRU
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
2025**

HALAMAN HAK CIPTA

**IMPLEMENTASI SISTEM DETEKSI OBJEK BERBASIS KAMERA 360
DERAJAT DAN 3D *LIDAR* PADA *HUSKY A200***

oleh
Jezzy Putra Munggaran
2106300

Sebuah Skripsi yang Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Komputer

© Jezzy Putra Munggaran
Universitas Pendidikan Indonesia
2025

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian, dengan dicetak
ulang, difotokopi, atau cara lainnya tanpa izin penulis

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

JEZZY PUTRA MUNGgaran

IMPLEMENTASI SISTEM DETEKSI OBJEK BERBASIS KAMERA 360 DERAJAT DAN 3D LIDAR PADA HUSKY A200

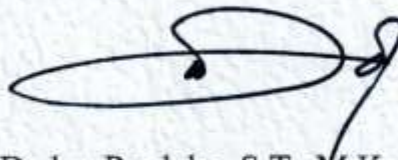
disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

Pembimbing I



Anugrah Adiwilaga, S.ST., M.T.
NIP. 920200819880813101

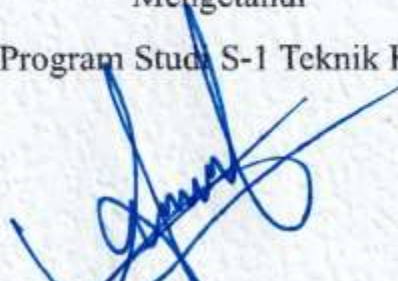
Pembimbing II



Deden Pradeka, S.T., M.Kom.
NIP. 920200419890816101

Mengetahui

Ketua Program Studi S-1 Teknik Komputer



Anugrah Adiwilaga, S.ST., M.T.
NIP. 920200819880813101

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama: Jezzy Putra Munggaran

NIM: 2106300

Program Studi: Teknik Komputer

Judul Karya: Implementasi Sistem Deteksi Objek Berbasis Kamera 360
Derajat dan 3D *LiDAR* pada *Husky A200*

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulis ini merupakan hasil kerja saya sendiri. Saya menjamin bahwa seluruh isi karya ini, baik sebagian maupun keseluruhan, bukan merupakan plagiarisme dari karya orang lain, kecuali pada bagian yang telah dinyatakan dan disebutkan sumbernya dengan jelas.

Jika di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap etika akademik atau unsur plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku di Universitas Pendidikan Indonesia.

Bandung, 27 Agustus 2025



Tanda tangan: _____

Jezzy Putra Munggaran

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, karunia, serta kemudahan yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Implementasi Sistem Deteksi Objek Berbasis Kamera 360 Derajat dan *3D LiDAR* pada *Husky A200*”. Penyelesaian skripsi ini tentunya tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak yang telah memberikan saran, kritik, serta motivasi kepada penulis. Dalam proses penelitian ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Allah swt., atas rahmat dan karunia-Nya yang tak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Kedua orang tua penulis, Bapak Muhtar dan Ibu Kunaeni, atas dukungan, doa, dan motivasi yang tak henti-hentinya diberikan sepanjang perjalanan perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi ini.
3. Bapak Anugrah Adiwilaga, S.ST., M.T., selaku dosen pembimbing pertama, atas bimbingan, arahan, dan dorongan yang konsisten selama proses penyelesaian skripsi. Kepercayaan yang beliau berikan sangat membantu penulis dalam mengembangkan diri dan menyelesaikan penelitian ini.
4. Bapak Deden Pradeka, S.T., M.Kom., selaku dosen pembimbing kedua, atas bimbingan, arahan, dan kritik konstruktif yang sangat membantu penulis dalam mengatasi berbagai tantangan akademik dan teknis selama penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Roni Permana Saputra, S.T., M.Eng.Sc., PhD., selaku pembimbing lapangan, atas bantuan teknis, panduan, dan solusi yang mendalam selama proses penelitian dan pengujian alat di lapangan.
6. Ibu Devi Aprianti Rimadhani Agustini, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing akademik, atas bimbingan dan arahan yang telah diberikan sejak awal perkuliahan hingga saat akhir perkuliahan, serta dukungan dalam pengembangan diri penulis.

7. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Komputer, atas ilmu, pengetahuan, dan wawasan berharga yang telah dibagikan sepanjang masa perkuliahan.
8. Bapak Titto Nasrul Syam, atas bantuan dan dukungan dalam pelaksanaan pengujian alat di lapangan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki berbagai keterbatasan. Oleh karena itu, penulis dengan tulus membuka diri terhadap saran dan kritik yang membangun demi perbaikan di masa mendatang, baik untuk penelitian ini maupun untuk penelitian-penelitian berikutnya. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penulisan ini, serta memohon maaf atas segala kekurangan yang mungkin terdapat dalam karya ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat yang berarti bagi para pembaca.

Bandung, 27 Agustus 2025

Penulis,

Jezzy Putra Munggaran

NIM 2106300

IMPLEMENTASI SISTEM DETEKSI OBJEK BERBASIS KAMERA 360 DERAJAT DAN 3D LIDAR PADA HUSKY A200

Jezzy Putra Munggaran
2106300

ABSTRAK

Berdasarkan kebutuhan keselamatan kerja, sistem persepsi yang andal pada robot mobile sangatlah dibutuhkan untuk membantu pemantauan dan pencegahan insiden di industri. Maka, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan serta mengevaluasi sistem deteksi objek berbasis *sensor fusion* dari sensor berupa kamera dan *LiDAR* pada robot mobile. Sistem dirancang menggunakan enam kamera *Arducam IMX477* yang disusun secara heksagonal agar cakupan mencapai 360 derajat, lalu hasil segmentasi objek pada tiap kamera diproyeksikan ke data *LiDAR PointCloud2* untuk menghitung jarak dan koordinat posisi dari setiap objek. Seluruh alur diimplementasikan pada *ROS 2* dan *Nvidia Jetson AGX Orin* agar mampu berjalan secara *real time* pada skenario uji *indoor*. Selanjutnya, evaluasi kinerja algoritma dilakukan menggunakan *precision*, *recall*, *F1 score*, dan *mAP*, sedangkan akurasi estimasi jarak serta koordinat dianalisis menggunakan *MAE* dan *RMSE*. Kemudian, stabilitas antarmuka diverifikasi melalui pengujian *black box* pada tampilan *grid 2×3* untuk memastikan seluruh *feed* tampil dan terbaca. Maka, hasil pengujian menunjukkan kinerja deteksi dengan *precision* 0,863, *recall* 0,870, *F1 score* 0,867, *mAP@0,5* sebesar 0,680, dan *mAP@0,5:0,95* sebesar 0,442. Selain itu, akurasi estimasi jarak berada pada rentang *MAE* 0,14 sampai 0,33 meter dan *RMSE* 0,17 sampai 0,36 meter, sedangkan rata-rata kesalahan koordinat *MAE* sumbu X sekitar 1,05 meter, Y sekitar 2,82 meter, dan Z sekitar 2,77 meter. Selanjutnya, pengujian *black box* pada tampilan *grid 2×3* menyatakan seluruh 6 kasus uji tampilan berhasil. Dengan demikian, disimpulkan bahwa sistem mampu mendeteksi objek untuk melakukan fungsi pengawasan, menghitung jarak secara konsisten, menyediakan tampilan yang informatif bagi operator, serta memberi dasar yang jelas untuk peningkatan akurasi koordinat.

Kata Kunci: fusi sensor, segmentasi objek, *LiDAR*, kamera 360 derajat, robot mobile.

IMPLEMENTATION OF AN OBJECT DETECTION SYSTEM BASED ON 360-DEGREE CAMERAS AND 3D LIDAR ON THE HUSKY A200

Jezzy Putra Munggaran
2106300

ABSTRACT

Driven by workplace safety requirements, reliable perception for mobile robots is needed to support monitoring and incident prevention in industrial settings. This study therefore develops and evaluates an object detection system based on sensor fusion of camera and LiDAR on a mobile robot. The system uses six Arducam IMX477 cameras arranged in a hexagon to achieve 360-degree coverage, and the segmentation output from each camera is projected onto LiDAR PointCloud2 data to compute the distance and position coordinates of each object. The full pipeline is implemented in ROS 2 and accelerated on an Nvidia Jetson AGX Orin so it can run in real time in indoor test scenarios. Algorithm performance is evaluated using precision, recall, F1 score, and mAP, while the accuracy of distance and coordinate estimation is analyzed using MAE and RMSE. Interface stability is verified through black box testing on a 2×3 grid display to ensure all feeds appear and are readable. The tests show detection performance with precision 0.863, recall 0.870, F1 score 0.867, mAP@0.5 of 0.680, and mAP@0.5:0.95 of 0.442. Distance estimation accuracy ranges from MAE 0.14 to 0.33 m and RMSE 0.17 to 0.36 m, while average coordinate errors are MAE of about 1.05 m on X, 2.82 m on Y, and 2.77 m on Z. Black box tests indicate all 6 of 6 display cases passed. The system can detect relevant objects for supervision, estimate distance consistently, provide an informative operator view, and offer a clear basis for improving coordinate accuracy.

Keywords: *sensor fusion, object segmentation, LiDAR, 360 degree cameras, mobile robot.*

DAFTAR ISI

HALAMAN HAK CIPTA	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN BEBAS PLAGIARISME.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR PERSAMAAN	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Manfaat Penelitian	5
1.4.1. Manfaat Teoritis.....	5
1.4.2. Manfaat Praktis	6
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.6. Struktur Organisasi Skripsi	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Tinjauan Pustaka	9
2.1.1. <i>Deep Learning</i>	9
2.1.2. <i>You Only Look Once (YOLO)</i>	11
2.1.3. <i>Dataset COCO</i>	14

2.1.4. <i>Robot Operating System (ROS)</i>	16
2.1.5. <i>Arducam IMX477</i>	18
2.1.6. <i>3D LiDAR Velodyne VLP-32C</i>	20
2.1.7. <i>Nvidia Jetson AGX Orin</i>	22
2.1.8. <i>Robot Mobile</i>	25
2.1.9. <i>Clearpath Husky A200</i>	26
2.1.10. <i>Sensor Fusion</i>	28
2.1.11. Kamera 360 Derajat.....	30
2.2. Penelitian Terkait	32
BAB III METODE PENELITIAN.....	36
3.1. <i>Analysis</i>	40
3.1.1. Tujuan, Pertanyaan Penelitian, dan Kriteria Keberhasilan.....	40
3.1.2. Konteks Implementasi dan Lingkup Proyek	42
3.1.3. Analisis Kebutuhan dan Spesifikasi Awal	42
3.1.4. Partisipan, <i>Setting</i> , dan Pertimbangan Etik	43
3.1.5. Rencana Data dan Instrumen Pengumpulan Data	43
3.2. <i>Design</i>	44
3.2.1. <i>System Engineering Life Cycle (SELC)</i>	44
3.2.2. <i>Software Development Life Cycle (SDLC)</i>	45
3.2.3. <i>Artificial Intelligence Life Cycle (AILC)</i>	46
3.2.4. Rancangan Diagram Arsitektur Sistem	47
3.2.5. Rancangan <i>Flowchart</i> Sistem.....	49
3.3. <i>Development</i>	51
3.3.1. Rencana Perangkat Keras yang Akan Digunakan	51
3.3.2. Rencana Perangkat Lunak yang Akan Digunakan	52

3.4. <i>Evaluation</i>	52
3.4.1. Metode Pengujian Algoritma Deteksi	53
3.4.2. Metode Pengujian Sistem Estimasi Penghitungan Jarak.....	53
3.4.3. Metode Pengujian Sistem Estimasi Koordinat Posisi	53
3.4.4. Metode Pengujian <i>Black Box Testing</i> untuk <i>Multicam Display Grid OpenCV 2×3</i>	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1. Hasil Pengembangan Sistem.....	56
4.1.1. Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak.....	56
4.1.2. <i>Refresh Knowledge</i> , Mempelajari <i>ROS 2</i> , dan Studi Komponen	60
4.1.3. Penyiapan <i>YOLO</i> di Jetson dan Kendala Kompatibilitas	61
4.1.4. <i>Flash</i> Ulang Jetson dan Perubahan ke <i>TensorRT</i>	62
4.1.5. Eksperimen Satu Kamera dan Pemilihan Varian Model	64
4.1.6. Percobaan Enam Kamera dan Keputusan untuk Tidak Lagi Menggunakan <i>Panorama Stitching</i>	66
4.1.7. <i>3D LiDAR Velodyne VLP-32C</i>	67
4.1.8. Kompilasi ke <i>TensorRT</i> dan Peralihan ke <i>Parallel Pipeline</i>	69
4.1.9. Implementasi Gabungan Data dari 6 Kamera dan <i>LiDAR</i>	70
4.2. Hasil Pengujian Sistem	89
4.2.1. Hasil Pengujian <i>Black Box</i> untuk <i>Multicam Display Grid OpenCV 2×3</i>	89
4.2.2. Hasil Pengujian Algoritma Deteksi	91
4.2.3. Hasil Pengujian Sistem Estimasi Penghitungan Jarak	98
4.2.4. Hasil Pengujian Sistem Estimasi Koordinat Posisi	105
4.3. Analisis Hasil Pengujian	119

4.3.1. Analisis Hasil Pengujian <i>Black Box</i> untuk <i>Multicam Display Grid</i> <i>OpenCV 2×3</i>	120
4.3.2. Analisis Hasil Pengujian Algoritma Deteksi	122
4.3.3. Analisis Hasil Pengujian Jarak	125
4.3.4. Analisis Hasil Pengujian Estimasi Koordinat Posisi	128
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	130
5.1. Simpulan	130
5.2. Saran	130
DAFTAR PUSTAKA	132
LAMPIRAN	138

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1: Arsitektur <i>Deep Learning</i>	10
Gambar 2.2: Komparasi model <i>YOLOv11</i> dengan versi sebelumnya (Sumber: https://docs.ultralytics.com/models/YOLOv11/#overview).....	12
Gambar 2.3: Arsitektur <i>YOLOv11</i> (Sumber: https://medium.com/@nikhil-rao-20/yolov11-explained-next-level-object-detection-with-enhanced-speed-and-accuracy-2dbe2d376f71).....	13
Gambar 2.4: Logo <i>Robot Operating System (ROS)</i> (Sumber: https://medium.com/dsc-sastra-deemed-to-be-university/ros-a-brief-introduction-17eccbb2043b).....	17
Gambar 2.5: Kamera <i>Arducam 12MP Multi-Camera Kit for Nvidia Jetson AGX Orin</i> (Sumber: https://www.arducam.com/arducam-12mp-multi-camera-kit-for-nvidia-jetson-agx-orin.html)	19
Gambar 2.6: <i>3D LiDAR Velodyne VLP-32C</i> (Sumber: https://www.mapix.com/lidar-scanner-sensors/velodyne/)	21
Gambar 2.7: <i>Nvidia Jetson AGX Orin 32 GB Developer Kit</i> (Sumber: https://www.mouser.co.id/new/seeed-studio/seeed-nvidia-jetson-agx-orin-developer-kit/?srsltid=AfmBOori-bvNsZsPbgFohguxYEGvt6S7wA2rlGbFVeQIErqXevo6lN1D).....	23
Gambar 2.8: Visualisasi robot mobile <i>Clearpath Husky A200</i> (Sumber: https://docs.clearpathrobotics.com/docs_robots/outdoor_robots/husky/a200/user_manual_husky/).....	28
Gambar 3.1: Tahapan metode <i>Design and Development Research</i>	39
Gambar 3.2: Siklus <i>SELC</i> (Sumber: https://ops.fhwa.dot.gov/seits/sections/section2/2_7.html)	45
Gambar 3.3: Siklus <i>SDLC</i> (Sumber: https://datarob.com/essentials-software-development-life-cycle/)	46
Gambar 3.4: Siklus <i>AILC</i> (Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Artificial-Intelligence-Life-Cycle_fig1_371713457)	47
Gambar 3.5: Rancangan Diagram Arsitektur Sistem	48

Gambar 3.6: Rancangan <i>Flowchart Sistem</i>	50
Gambar 4.1: Foto Unit Husky A200 di Lokasi Uji	56
Gambar 4.2: Foto konfigurasi enam kamera dan <i>LiDAR</i> pada menara buatan hasil <i>3D printing</i> di bagian depan <i>Husky</i>	57
Gambar 4.3: Foto unit <i>3D LiDAR Velodyne VLP-32C</i> (di paling atas dari <i>tower</i>) di lokasi uji	57
Gambar 4.4: Foto konfigurasi dari <i>wiring LiDAR</i>	58
Gambar 4.5: Foto unit 6 kamera <i>Arducam IMX477</i> yang sudah disusun secara heksagonal untuk memenuhi cakupan 360 derajat di lokasi uji	58
Gambar 4.6: Foto unit <i>Nvidia Jetson AGX Orin 32 GB</i> di lokasi uji	59
Gambar 4.7: Foto konfigurasi dari <i>wiring</i> di <i>Nvidia Jetson AGX Orin 32 GB</i>	59
Gambar 4.8: <i>Node ROS 2</i> Versi Awal, Kamera dan <i>LiDAR</i> Dipublikasikan ke Topik yang Masih Bersifat Serial	61
Gambar 4.9: Alur ekspor model <i>YOLO</i> ke <i>TensorRT</i> , dari file “.pt” ke “.engine”	64
Gambar 4.10: Percobaan implementasi model <i>object detection pretrained</i> dari <i>YOLO</i>	65
Gambar 4.11: Hasil Bila Menggunakan <i>Panorama Stitching</i> (Gagal)	67
Gambar 4.12: Cuplikan Opsi Tampilan <i>Grid 2×3</i> pada Monitor Operator yang Akhirnya Dipilih	67
Gambar 4.13: Tangkapan Layar <i>RViz2</i> yang Menampilkan Data <i>/LaserScan</i> dari <i>VLP-32C</i>	68
Gambar 4.14: Tangkapan Layar <i>RViz2</i> yang Menampilkan Data <i>/PointCloud2</i> dari <i>VLP-32C</i>	69
Gambar 4.15: Diagram Arsitektur Paralel dengan <i>Multithreading</i>	70
Gambar 4.16: Tangkapan layar hasil akhir dari proses penggabungan 6 kamera dan <i>LiDAR</i> yang menghasilkan data <i>Class</i> , <i>Confidence</i> , <i>Distance</i> , dan <i>Coordinate</i>	89
Gambar 4.17: <i>Dataset</i> yang digunakan untuk Pengujian	92
Gambar 4.18: <i>Overall Performance Metrics</i>	92
Gambar 4.19: <i>Precision per Class</i>	93
Gambar 4.20: <i>Recall per Class</i>	94

Gambar 4.21: <i>F1-Score per Class</i>	94
Gambar 4.22: <i>Average Precision per Class</i>	95
Gambar 4.23: <i>Predictions vs Ground Truth Count</i>	96
Gambar 4.24: <i>True Positive Rate per Class</i>	96
Gambar 4.25: <i>Performance Summary</i>	97
Gambar 4.26: Proses Pengujian Jarak	98
Gambar 4.27: Grafik dari Hasil Pengujian Pertama	100
Gambar 4.28: Grafik dari Hasil Pengujian Kedua	102
Gambar 4.29: Grafik dari Hasil Pengujian Ketiga	104
Gambar 4.30: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu X pada Pengujian 1	107
Gambar 4.31: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Y pada Pengujian 1	108
Gambar 4.32: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Z pada Pengujian 1	109
Gambar 4.33: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu X pada Pengujian 2	112
Gambar 4.34: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Y pada Pengujian 2	113
Gambar 4.35: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Z pada Pengujian 2	114
Gambar 4.36: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu X pada Pengujian 3	117
Gambar 4.37: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Y pada Pengujian 3	118
Gambar 4.38: Grafik Perbandingan Hasil Sebenarnya dengan Hasil Deteksi di Sumbu Z pada Pengujian 3	119

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait	32
Tabel 3.1 <i>Representative Clusters of Design and Development Research</i> (diadaptasi dari Richey & Klein, 2007, hlm. 8) 37	
Tabel 3.2 Tujuan, Pertanyaan, dan Kriteria Keberhasilan dari Penelitian	41
Tabel 3.3 Perangkat Keras yang Akan Digunakan.....	51
Tabel 3.4 Perangkat Lunak yang Akan Digunakan.....	52
Tabel 3.5 Format Tabel Hasil Uji <i>Black Box</i> Per Kamera (kamera 1 sampai 6) ...	55
Tabel 3.6 Format Tabel Hasil Uji <i>Black Box</i> Multicam Display Grid 2×3 (tingkat sistem)	55
Tabel 4.1 Dokumentasi Versi-Versi yang Kompatibel untuk Penelitian ini.	63
Tabel 4.2 Alur Ekspor Model <i>YOLO</i> ke <i>TensorRT</i> , dari file “.pt” ke “.engine” ..	64
Tabel 4.3 Dokumentasi Cara Menghubungkan <i>Velodyne VLP-32C</i> ke <i>Jetson</i>	68
Tabel 4.4 Gambaran Umum dari Proses Penggabungan Data Kamera dan <i>LiDAR</i>	70
Tabel 4.5 Ringkasan dari Proses Inisialisasi Penggabungan Data Keenam Kamera dan <i>3D LiDAR</i>	71
Tabel 4.6 Proses <i>Setup</i> Kalibrasi Intrinsik dan Ekstrinsik Kamera- <i>LiDAR</i>	72
Tabel 4.7 Ringkasan Proses Inisialisasi Model Segmentasi.....	74
Tabel 4.8 Ringkasan Langkah Akuisisi dan Sinkronisasi Data.....	75
Tabel 4.9 Ringkasan Langkah Proyeksi <i>PointCloud</i> dari <i>LiDAR</i> ke Kamera.....	76
Tabel 4.10 Ringkasan Langkah Inferensi Segmentasi dan Ekstraksi <i>Cloud</i>	77
Tabel 4.11 Ringkasan Tahap Pengukuran Jarak di dalam <i>Code</i>	79
Tabel 4.12 Ringkasan Langkah Filtrasi Kelas Objek.....	81
Tabel 4.13 Ringkasan Proses Penyusunan Label Per Kamera	82
Tabel 4.14 Ringkasan Langkah Penggabungan Enam Kamera untuk Ditampilkan Di <i>Output</i>	83
Tabel 4.15 <i>Review</i> Penjelasan dari Algoritma <i>Fusion</i>	84
Tabel 4.16 Hasil Uji <i>Black Box</i> Per Kamera (kamera 1 sampai 6)	90

Tabel 4.17 Hasil Uji <i>Black Box</i> Multicam Display Grid 2×3 (dalam tingkat sistem)	91
Tabel 4.18 Hasil Pengujian Jarak Pertama	98
Tabel 4.19 Hasil Pengujian Jarak Kedua	101
Tabel 4.20 Hasil Pengujian Jarak Ketiga	103
Tabel 4.21 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Pertama	105
Tabel 4.22 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Pertama (<i>MAE</i> dan <i>RMSE</i>)	105
Tabel 4.23 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Kedua	110
Tabel 4.24 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Kedua (<i>MAE</i> dan <i>RMSE</i>)	110
Tabel 4.25 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Ketiga	115
Tabel 4.26 Tabel Hasil Pengujian Koordinat Posisi Ketiga (<i>MAE</i> dan <i>RMSE</i>)	115

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 1: Operasi Linear Dasar <i>Deep Learning</i>	9
Persamaan 2: Keluaran <i>Neuron</i>	10

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data dan Dokumentasi Pengujian Jarak	138
Lampiran 2. Data dan Dokumentasi Pengujian Estimasi Koordinat	138
Lampiran 3. Data dan Dokumentasi Pengujian Algoritma	139
Lampiran 4. Kode Program	140
Lampiran 5. Lampiran Jadwal Penelitian	141
Lampiran 6. Lampiran Hasil Pengecekan <i>TurnItIn</i>	142
Lampiran 7. Lampiran Hasil Pengecekan <i>GPTZero</i>	143
Lampiran 8. Tabel Hasil Uji Black Box Per Kamera (kamera 1 sampai 6).....	143
Lampiran 9. Tabel Hasil Uji Black Box Multicam Display Grid 2×3 (Dalam Tingkat Sistem).....	145

DAFTAR PUSTAKA

- Abdar, M., dkk. (2023). Fully convolutional neural networks for LIDAR–camera fusion for pedestrian detection in autonomous vehicle. *Multimedia Tools and Applications*, 82, 32473–32496. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14417-x>
- Abdel-Aty, M., & Ding, S. (2024). A Matched Case-Control Analysis of Autonomous vs Human-Driven Vehicle Accidents. *Nature Communications*, 15, 4931. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48526-4>
- Abdel-Aty, M., & Ding, Y. (2023). Impact Of Autonomous Control Systems On Traffic Collision Reduction: A Simulation-Based Analysis. *Journal of Transportation Safety*, 15(3), 45–67.
- Alfred Daniel, J., Chandru Vignesh, C., Muthu, B. A., Senthil Kumar, R., Sivaparthipan, C. B., & Montenegro Marin, C. E. (2023). Fully Convolutional Neural Networks for LiDAR–Camera Fusion for Pedestrian Detection in Autonomous Vehicle. *Multimedia Tools and Applications*, 82(16). doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14417-x>
- Anderson, J. (2021). Autonomous Vehicle Platforms In Research: A Review Of Clearpath Husky A200. *Robotics and Automation Journal*, 8(2), 112–125.
- Arducam. (2023). *Arducam IMX477 high-resolution camera module specifications*. <https://www.arducam.com/imx477>
- Bai, L., Zhou, J., Wang, J., Zhou, Y., & Yang, R. (2022). TransFusion: Robust Lidar–Camera Fusion For 3D Object Detection With Transformers. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (. 10924–10933). <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01067>
- Caesar, H., Bankiti, V., Lang, A. H., Vora, S., Liong, V. E., Xu, Q., ... Beijbom, O. (2021). nuScenes: A multimodal dataset for autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(10), 4567–4582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2998912>
- Chen, L., Wang, H., & Zhang, Y. (2020). Sensor Fusion For 3d Environmental Mapping In Autonomous Vehicles. *Autonomous Systems Journal*, 12(4), 78–94.
- Chen, T., Li, M., & Wu, Z. (2022). Architectural Advancements in Edge Computing For Autonomous Systems. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 203–210.
- Cheng, B., Misra, I., Schwing, A. G., Kirillov, A., & Girdhar, R. (2022). Masked-Attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1290–1299. <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00139>
- Clearpath Robotics. (2023). *Husky A200: Technical Specifications*. <https://clearpathrobotics.com/husky>
- Clearpath Robotics. (n.d.). *Husky UGV*. <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>

- De Silva, D., & Alahakoon, D. (2022). Artificial Intelligence Life Cycle (AILC): A Framework for Ethical AI Development. *AI Ethics Journal*, 5(1), 33–49.
- Gao, J., & Li, S. (2022). Classification and Object Detection Of 360-Degree Omnidirectional Images: A Survey. *Applied Sciences*, 12(16), 8103. <https://doi.org/10.3390/app12168103>
- Gao, J., Li, W., Chen, K., Chen, X., & Wang, M. (2022). A Review On 360° Computer Vision For Automotive Applications: *Datasets, Methods, And Challenges*. arXiv preprint arXiv:2210.01794. <https://arxiv.org/abs/2210.01794>
- Garcia, R., Martinez, F., & Lopez, A. (2022). Enhancing Object Detection Accuracy Through LiDAR and Camera Fusion. *Sensors*, 22(15), Article 5678. <https://doi.org/10.3390/s22155678>
- Golroudbari, S., & Sabour, M. H. (2023). Deep Learning Applications in Adaptive Navigation Systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 34(6), 2901–2915.
- Gupta, A., Dollár, P., & Girshick, R. (2019). Lvis: A Dataset for Large Vocabulary Instance Segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5356–5364). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00550>
- Häne, C., Zach, C., & Pollefeys, M. (2021). Depth-Based Obstacle Detection Using Fisheye Cameras. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 1234–1241.
- Haris, M., & Hou, J. (2020). Obstacle Detection and Safely Navigate the Autonomous Vehicle from Unexpected Obstacles on the Driving Lane. *Sensors*, 20(17), 4719. doi: <https://doi.org/10.3390/s20174719>
- Holzhüter, H., Bödwadt, J., Bayesteh, S., Aschinger, A., & Blume, H. (2023). Technical Concepts of Automotive LiDAR Sensors: A Review. *Optical Engineering*, 62(3), 031213. doi: <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.3.031213>
- Holzhüter, T., dkk. (2023). LiDAR Technology For Autonomous Vehicles: A Review Of System Principles and Performance Considerations. *Optical Engineering*, 62(8), Article 081806. <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.8.081806>
- International Labour Organization. (2023, November 26). *Nearly three million people die every year due to work-related accidents and diseases*. <https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases> International Labour Organization
- International Labour Organization. (2024, April 28). *The enormous burden of poor working conditions*. <https://www.ilo.org>
- International Organization for Standardization. (2020). *ISO 3691-4:2020 Industrial trucks—Safety requirements and verification—Part 4: Driverless industrial trucks and their systems*. <https://www.iso.org/standard/70660.html> ISO
- Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). YOLOv11: State-of-the-art real-time object detection. Ultralytics. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- Johnson, R., & Lee, S. (2023). ROS 2-Based Communication Frameworks for Autonomous Vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 158, Article 104305. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104305>

- Kartikasari, R. Y., Prakarsa, G., & Pradeka, D. (2020). Optimization of Traffic Light Control Using Fuzzy Logic Sugeno Method. *International Journal of Global Operations Research*, 1(2), 51-61.
- Kato, S., Tokunaga, S., & Maruyama, Y. (2022). Real-Time Path Planning Using Ros 2 in Dynamic Environments. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 501–508.
- Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2024). *Satu Data Ketenagakerjaan: Kecelakaan kerja 2023*. <https://satudata.kemnaker.go.id/>
- Kim, H., Park, J., & Lee, K. (2022). Real-Time Sensor Data Processing with Nvidia Jetson AGX Orin. *Journal of Embedded Systems*, 19(3), 45–59.
- Kumar, P., Eising, C., Witt, A., & Yogamani, S. (2023). Surround-View Fisheye Camera Perception for Automated Driving: Topology, Algorithms, and Datasets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3300652>
- Kumar, P., Eising, C., Witt, A., & Yogamani, S. (2023). Surround-View Fisheye Camera Perception for Automated Driving: Topology, Algorithms, and Datasets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4). doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3235057>
- Kuriakose, B., Shrestha, R., & Sandha, S. S. (2022). LiDAR-Based Obstacle Detection in Indoor Environments. *IEEE Sensors Journal*, 22(18), 17845–17856.
- Lee, J., & Park, H. (2023). Modular Sensor Integration for Autonomous Navigation. *Autonomous Robots*, 47(4), 567–582.
- Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft COCO: Common objects in context. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision* (pp. 740–755). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48
- Liu, Z., Tang, H., Amini, A., Yang, X., Mao, H., Rus, D., & Han, S. (2023). BEVFusion: Multi-Task Multi-Sensor Fusion with Unified Bird's-Eye View Representation. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2774–2781. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160968>
- Long, X., Li, Z., & Wang, Y. (2022). Polarized Camera and LiDAR Fusion For Obstacle Detection Under Varying Illumination. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7(3), 621–633.
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., & Lalancette, C. (2023). ROS 2 in Real-World Applications: A Case Study. *Journal of Open Source Robotics*, 9(1), 1–15.
- Mapix Technologies. (2020). Velodyne Ultra Puck VLP-32C datasheet [PDF]. Retrieved from Mapix Technologies website. <https://mapix.com/wp-content/uploads/2020/02/63-9378-Rev-D-ULTRA-Puck-VLP-32C-Datasheet.pdf>
- Maruyama, Y. (2023). Evolution of ROS: From ROS 1 to ROS 2. *Robotics Today*, 14(2), 34–45.

- Moniruzzaman, M., Prasad, M., & Correa, N. (2025). Teleoperation For Mobile Manipulation: A Survey of Interfaces and Safety Considerations. *IEEE Access*, 13, 88128–88166. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025>
- National Institutes of Health. (2024). Performance Notes And Accuracy Ranges For Velodyne Multi-Beam Lidar in Indoor Environments [Technical summary referencing ± 3 cm claims]. PubMed Central. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
- Nguyen, T., Vo, T., & Pham, V. (2023). Efficient Object Detection with YOLO Variants. *IEEE Access*, 11, 12345–12356.
- Noor, A., & Ige, O. (2023). Deep Learning in Robotics: A Comprehensive Survey. *Artificial Intelligence Review*, 56(7), 789–812.
- Nvidia. (2020). ros_deep_learning: Deep Learning Inference Nodes for ROS With Jetson. https://github.com/dusty-nv/ros_deep_learning
- Perfetti, L., Bruno, N., & Roncella, R. (2024). Multi-Camera Rig and Spherical Camera Assessment for Indoor Surveys in Complex Spaces. *Sensors*, 24(19), 7020. doi: <https://doi.org/10.3390/s24197020>
- Petrovai, A., & Nedeveschi, S. (2022). Semantic Cameras for 360-Degree Environment Perception in Automated Urban Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 17271–17283. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3156794>
- Pratama, D., Wijaya, A., & Hidayat, R. (2022). Semantic segmentation for autonomous vehicle navigation. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(4), 567–580.
- Reddy, V., Kumar, S., & Patel, R. (2023). High-Resolution Camera Systems for Autonomous Vehicles. *Sensors and Actuators A: Physical*, 345, Article 113678. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.113678>
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>
- Richey, R. C., & Klein, J. D. (2007). *Design And Development Research: Methods, Strategies, and Issues*. London: Routledge.
- Rodriguez, L., & Perez, M. (2022). Evolution of Clearpath Husky Platforms for Research. *International Journal of Robotics Research*, 41(5), 601–615.
- ROS Index. (n.d.). velodyne (ROS 2 driver stack). <https://index.ros.org/p/velodyne/>
- ROS Index. (n.d.). velodyne_pointcloud (ROS 2). https://index.ros.org/p/velodyne_pointcloud/ (Diakses 14 Agustus 2025)
- ROS Organization. (2024). ROS 2 Documentation: Humble Hawksbill. <https://docs.ros.org> (Diakses 14 Agustus 2025)
- ROS.org. (2023). Velodyne Driver (ROS/ROS 2) documentation. <https://wiki.ros.org/velodyne>
- Sharkawy, A. (2023). Optimizing Deep Neural Networks for Real-Time Applications. *Neural Computing and Applications*, 35(10), 789–802.
- Smith, T., Brown, A., & Wilson, D. (2023). Performance Evaluation of Nvidia Jetson Agx Orin In Autonomous Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(8), 8901–8910.

- Soián, M., dkk. (2022). Road Marking Degradation Analysis Using 3D Point Clouds From a Velodyne VLP-32C. *Automation in Construction*, 141, 104465. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104465>
- Soilán, M., González-Aguilera, D., del-Campo-Sánchez, A., Hernández-López, D., & Del Pozo, S. (2022). Road Marking Degradation Analysis Using 3D Point Cloud Data Acquired with a Low-Cost Mobile Mapping System. *Automation in Construction*, 141, 104446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104446>
- Soltanpour, S., Ososanya, E., & Yavari, A. (2025). A Survey on Feature-Based And Deep Image Stitching. In *Proceedings of VISIGRAPP 2025* (hlm. 777–788). SCITEPRESS.
<https://www.scitepress.org/Papers/2025/133685/133685.pdf>
- Sukumar, S. (2022). Fusion of LiDAR and Camera Sensor Data for Environment Sensing In Driverless Vehicles. *Loughborough University*. Preprint. <https://doi.org/10.17028/rd.lboro.9466361>
- Sun, P., Kretzschmar, H., Dotiwalla, X., Chouard, A., Patnaik, V., Tsui, P., ... Zhao, S. (2020). Scalability in Perception for Autonomous Driving: Waymo Open Dataset. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2446–2454). https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/html/Sun_Scalability_in_Perception_for_Autonomous_Driving_Waymo_Open_Dataset_CVPR_2020_paper.html
- Suteddy, W., Agustini, D. A. R., Adiwilaga, A., & Atmanto, D. A. (2023). End-To-End Evaluation of Deep Learning Architectures for Off-Line Handwriting Writer Identification: A Comparative Study. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 7(1), 178-185.
- Ultralytics. (2025b). *Export YOLO models to TensorRT (format='engine')*. <https://docs.ultralytics.com/integrations/tensorrt/>
- Velodyne Lidar, Inc. (2019). *Ultra-Puck (VLP-32C) datasheet*. https://data.ouster.io/downloads/datasheets/velodyne/63-9378_Rev-F_Ultra-Puck_Datasheet_Web.pdf
- Velodyne Lidar, Inc. (2024). *VLP-32C: Product page & specifications*. <https://www.mapix.com/lidar-scanner-sensors/velodyne/velodyne-vlp-32c/>
- Venkat, V., & Reddy, R. (2023). Review and Analysis of the Properties of 360-Degree Surround View Cameras in Autonomous Vehicles. *International Journal of Science and Research Archive*, 8(2), 656–661. doi: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.8.2.0333>
- Vora, S., Lang, A. H., Helou, B., & Beijbom, O. (2020). PointPainting: Sequential Fusion for 3D Object Detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (hlm. 4604–4614). <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00466>
- Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., & Liao, H.-Y. M. (2023). YOLOv7: Trainable Bag-Of-Freebies Sets New State-Of-The-Art for Real-Time Object Detectors. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02696>

- Wang, Q., Zhang, L., & Liu, Y. (2022). Deep Learning Architectures for Real-Time Applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(6), 3015–3029.
- White, G., Cabrera, C., & Palafox, L. (2022). ROS 2 and Ubuntu Integration for Robotic Systems. *Journal of Software Engineering for Robotics*, 13(2), 45–60.
- Xu, Y., Wang, P., Li, L., & Liu, X. (2020). MVX-Net: Multimodal VoxelNet for 3D Object Detection In Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 5(4), 694–703.
- Zang, S., dkk. (2022). Semantic Cameras for 360-Degree Environment Perception in Automated Urban Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 12345–12358. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.9733968>
- Zhang, F., Zhao, J., Zhang, Y., & Zollmann, S. (2023). A Survey On 360° Images and Videos In Mixed Reality: Algorithms And Applications. *Journal of Computer Science and Technology*, 38(3), 473–491. <https://doi.org/10.1007/s11390-023-3210-1>
- Zhang, H., & Li, W. (2024). Hexagonal Camera Arrays For 360-Degree Coverage in Autonomous Vehicles. *Journal of Imaging Systems and Technology*, 30(1), 112–125.
- Zhang, K., & Liu, M. (2021). A Review on Panoramic Image Stitching Techniques. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2021)* (pp. 423–430). SciTePress. <https://doi.org/10.5220/0010185804230430>
- Zhang, Y., Chen, X., & Wang, Z. (2023). Edge Computing Platforms for Autonomous Systems: A Comparative Study. *Future Generation Computer Systems*, 148, 201–215.