UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion Untuk Segmentasi Semantik Pada Citra Relief Candi Borobudur
Lukman Awaludin, Prof. Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D.; Wahyono, S.Kom., Ph.D.; Dr. Dra. Niken Wirasanti, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
HALAMAN PERSEMBAHAN vi
PRAKATA vii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xiii
INTISARI xiv
ABSTRACT xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Research Gap 3
1.3 Rumusan Masalah 5
1.4 Batasan Masalah 6
1.5 Tujuan Penelitian 6
1.6 Manfaat Penelitian 6
1.7 Kontribusi Penelitian 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 8
2.1 Data Citra Relief 8
2.2 Ekstraksi Fitur 12
2.2.1 Metode Klasikal Machine Learning 16
2.2.2 Metode Deep Learning 19
2.2.3 Perkembangan Metode Deep Learning Terkini (2021–2024) 23
BAB III LANDASAN TEORI 25
3.1 Segmentasi Semantik 25
3.2 Dataset 25
3.3 Relief 26
3.4 Segmentasi 27
3.5 Convolutional Neural Network (CNN) 27
3.6 Algoritma Fusion 28
3.7 Inisialisasi Kaiming Normal 29
3.8 Atrous Convolution 30
BAB IV METODE PENELITIAN 31
4.1 Terminologi dan Notasi 31
4.2 Rancangan Pengambilan Data Citra Relief 32
4.3 Rancangan Sistem Segmentasi Semantik 34
4.3.1 Rancangan Umum 34
4.3.2 Data Citra Relief 35
4.3.3 Citra Fusi 37
4.4 Rencana Pengujian 37

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion Untuk Segmentasi Semantik Pada Citra Relief Candi Borobudur
Lukman Awaludin, Prof. Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D.; Wahyono, S.Kom., Ph.D.; Dr. Dra. Niken Wirasanti, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.4.1 Data Pengujian 38
4.4.2 Skenario Pengujian 38
4.4.3 Metrik Evaluasi 39
4.5 Akuisisi Data 43
4.6 Pembentukan Dataset 46
BAB V HASIL DAN ANALISIS MODEL PEMBENTUKAN CITRA DEPTH 51
5.1 Pembentukan Citra Depth Berdasar Citra Stereo 51
5.2 Evaluasi Pembentukan Citra Depth berdasar Citra Stereo 55
5.2.1 Evaluasi metode klasikal dalam pembentukan citra depth 55
5.3 Penggunaan Depth Anything untuk Pembentukan Depth 66
BAB VI HASIL DAN ANALISIS METODE SEGMENTASI SEMANTIK DAN METODE COMPLEMENTARY-STREAM SUM FUSION 71
6.1 Pengembangan Metode Segmentasi Semantik RGBD 71
6.2 Fusi RGBD dalam Segmentasi Semantik dengan Arsitektur CNN 72
6.2.1 Desain Arsitektur dan Konfigurasi Pelatihan 72
6.2.2 Proses Pelatihan 74
6.2.3 Analisis Kualitatif Hasil Segmentasi 75
6.2.4 Evaluasi Kuantitatif Performa Validasi 75
6.2.5 Analisis IoU per Kelas 77
6.2.6 Evaluasi pada Data Test 78
6.2.7 Efisiensi Parameter dan Komputasi 79
6.2.8 Pemilihan Arsitektur untuk Pengembangan Selanjutnya 80
6.3 Pengembangan Dual-Branch 81
6.3.1 Pembentukan citra softedge menggunakan DoG 81
6.3.2 Desain Input dan Konfigurasi Pelatihan 86
6.3.3 Dinamika Pelatihan Kedua Aliran atau Cabang 87
6.3.4 Stabilitas Model dengan 5-Fold Cross-Validation 87
6.3.5 Evaluasi pada Data Test 88
6.3.6 Analisis IoU per Kelas pada Data Test 88
6.3.7 Evaluasi Detail pada Data Validasi 89
6.3.8 Komplementaritas dan Implikasi untuk Fusion 91
6.4 Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion 91
6.4.1 Struktur Data 92
6.4.2 Metode Fusion yang Diimplementasikan 94
6.4.3 Analisis Kualitatif Hasil CSSF 106
6.5 Analisis Komparatif Seluruh Metode 108
6.5.1 Ablasi Komponen Arsitektur 113
6.5.2 Perbandingan dengan Metode State-of-the-Art 114
BAB VII PENUTUP 117
7.1 Kesimpulan 117
7.2 Pernyataan Kontribusi 120
7.3 Saran 121
LAMPIRAN

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion Untuk Segmentasi Semantik Pada Citra Relief
Candi Borobudur
Lukman Awaludin, Prof. Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D.; Wahyono, S.Kom., Ph.D.; Dr. Dra. Niken Wirasanti, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Contoh citra RGB dari dataset (Yunmar dan Harjoko, 2014)..... 9
Gambar 2.2. Contoh citra dataset RRD (Frisky dkk., 2021)..... 10
Gambar 2.3. Diagram pohon fitur-fitur (Mutlag dkk., 2020)..... 13
Gambar 2.4. Ilustrasi segmentasi semantik (Bandyopadhyay, 2023) 17
Gambar 2.5. Menunjukkan ketegori teknik segmentasi citra..... 17
Gambar 2.6. Multi-class segmentation visual comparisons on KITTI (Lu, Sarkis dan Lu, 2020). 23
Gambar 3.1. Contoh tampilan relief (a) Gandavyuha Panel J No.2 dan (b) Gandavyuha Panel J No.3 26
Gambar 3.2. Contoh arsitektur CNN (Lecun dkk., 2010)..... 28
Gambar 4.1. Konfigurasi pengambilan data citra relief..... 33
Gambar 4.2. Salah satu contoh data relief (relief Gandavyuha Panel C No.3) yang diperoleh dari pengambilan data menggunakan Intel Realsense 34
Gambar 4.3. Ilustrasi pembuatan *ground truth* secara manual 35
Gambar 4.4. Ilustrasi tingkat atau level segmentasi semantik pada Relief Gandavyuha Panel C No.3 35
Gambar 4.5. Perbandingan kualitas citra panel relief. Atas: panel kondisi baik, Relief Gandavyuha Panel A No.1 (brightness 160) dan Panel A No.4 (brightness 143). Bawah: panel kondisi kurang baik, Relief Lalitavistara Panel J No.4 (brightness 84) dan Panel B No.1 (brightness 94). 46
Gambar 4.6 Citra stereo yang dihasilkan dari IntelRealsense D455..... 46
Gambar 4.7. Lokasi dan ilustrasi kondisi saat pengambilan data 47
Gambar 4.8. Contoh hasil segmentasi pada (a) relief Gandavyuha Panel H No.1 dan (b) relief Lalitavistara Panel A No.4 secara manual menggunakan Labelbox 50
Gambar 5.1. Diagram Metode yang diusulkan berdasar stereo kamera 54
Gambar 5.2. Diagram proses evaluasi..... 56
Gambar 5.3. Perbandingan visual peta kedalaman pada panel BC5, BC6, dan BC7: (Kol.1) Ground truth D455; (Kol.2) BM+HARRIS; (Kol.3) BM; (Kol.4) NCC; (Kol.5) SGBM-A1 63
Gambar 5.4. Analisis Pareto: RMSE vs. waktu eksekusi (skala log) untuk 22 konfigurasi stereo klasikal. BM+HARRIS meraih skor Pareto terbaik 64
Gambar 5.5. Visual hasil citra refined tuning citra depth dari stereo kamera..... 66
Gambar 5.6. Bagan proses penggunaan Depth Anything V2 68
Gambar 5.7. Grafik trade-off akurasi vs. waktu inferensi: ViTs (Small), ViTb (Base), dan ViTl (Large) pada model Depth Anything V2..... 69
Gambar 5.8. Hasil visual citra kedalaman menggunakan Depth Anything V2 (ViTb) pada dataset panel relief Borobudur..... 70
Gambar 6.1. Dinamika pelatihan selama 50 epoch: (kiri) compound loss train/validasi; (kanan) progresi mIoU validasi, ★ menandai checkpoint terbaik . 74

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion Untuk Segmentasi Semantik Pada Citra Relief Candi Borobudur
Lukman Awaludin, Prof. Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D.; Wahyono, S.Kom., Ph.D.; Dr. Dra. Niken Wirasanti, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 6.2. Perbandingan overlay kualitatif pada sampel panel test (BB1, LBE1, LSI1): RGB | Ground Truth | DeepLabV3+ ★ | PSPNet | SegNet | DenseUNet | U-Net pada empat sampel (4–7 kelas FG) 76
Gambar 6.3. Analisis tiga baris (Sampel 1, 7 kelas FG): *overlay*, peta prediksi, dan *error map*. Hijau=Benar, Merah=Salah, Abu-abu=*Background*. DeepLabV3+ (border biru): error hanya di batas kelas 77
Gambar 6.4. Arsitektur complementary-stream sum fusion (CSSF) 94
Gambar 6.5. Pencarian β optimal, mIoU dan F1 terhadap berbagai nilai β..... 96
Gambar 6.6. Bobot α optimal per kelas hasil EM fusion..... 98
Gambar 6.7. Perbandingan visual pada panel BB1 (Gandavyuha Barat B1), LBE1 (Lalitavistara Barat E1), dan LSI1 (Lalitavistara Selatan I1): RGB, GT, RGBD Pred, Edge Pred, Fusion Pred, Overlay..... 104
Gambar 6.8. Visualisasi EM fusion pada panel BB1 (Gandavyuha Barat B1), LBE1 (Lalitavistara Barat E1), dan LSI1 (Lalitavistara Selatan I1): RGB, Depth, SoftEdge, GT, RGBD, Edge, EM Fusion + alpha per class 104
Gambar 6.9. Perbandingan visual hasil segmentasi pada empat panel test: (a) citra RGB, (b) ground truth, (c) prediksi RGBD Branch, (d) prediksi Edge-Depth Branch, (e) prediksi CSSF (metode yang diusulkan). CSSF secara konsisten memulihkan batas kelas yang lebih halus dan mengurangi kesalahan pada objek kecil serta konfusi antar-kelas. 107
Gambar 6.10. Perbandingan mIoU dan F1-Score seluruh metode..... 108
Gambar 6.11. Perbandingan IoU per kelas: RGBD vs Edge-Depth vs EM Fusion 110

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Metode Complementary-Stream Sum Fusion Untuk Segmentasi Semantik Pada Citra Relief Candi Borobudur
Lukman Awaludin, Prof. Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D.; Wahyono, S.Kom., Ph.D.; Dr. Dra. Niken Wirasanti, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kelebihan dan kekurangan dataset yang tersedia 11
Tabel 2.2. Perbandingan penelitian 15
Tabel 2.3. Kelebihan dan kekurangan penelitian menggunakan metode klasikal 19
Tabel 2.4. Kelebihan dan kekurangan penelitian sebelumnya 21
Tabel 4.1. Pembagian Dataset Untuk Keperluan Pengujian 38
Tabel 4.2. Skenario pengujian bertingkat pada penelitian 39
Tabel 4.3. Pembagian kelas objek pada citra relief 47
Tabel 5.1. Hasil evaluasi metode berbasis fitur (SIFT, ORB, FAST+ORB, HARRIS+ORB) pada 246 citra stereo panel 57
Tabel 5.2. Hasil Evaluasi Waktu Eksekusi Metode Berbasis Intensitas 59
Tabel 5.3. Hasil evaluasi 22 konfigurasi stereo klasikal pada 246 panel relief 61
Tabel 5.4. Lima Metode Tercepat (Top-5) dari 22 Konfigurasi Stereo Klasikal.. 62
Tabel 5.5. Penjelasan tahapan refined tuning citra depth dari stereo kamera 65
Tabel 6.1. Konfigurasi arsitektur dan adaptasi input RGBD 73
Tabel 6.2. Performa validasi dan stabilitas konvergensi pada checkpoint optimal 76
Tabel 6.3. IoU per Kelas pada Data Validasi 78
Tabel 6.4. Perbandingan metrik test pada checkpoint terbaik 80
Tabel 6.5. Perbandingan efisiensi parameter dan komputasi 81
Tabel 6.6. Konfigurasi input kedua cabang model 86
Tabel 6.7. Ringkasan dinamika pelatihan kedua aliran atau cabang 87
Tabel 6.8. Hasil 5-fold cross validation 88
Tabel 6.9. Metrik evaluasi pada data test 88
Tabel 6.10. IoU per kelas pada data test: RGBD vs Edge-Depth 89
Tabel 6.11. Hasil klasifikasi RGBD branch (data validasi, tanpa BG) 90
Tabel 6.12. Hasil klasifikasi Edge-Depth branch (data validasi, tanpa BG) 90
Tabel 6.13. Ringkasan metrik validasi (tanpa BG) 91
Tabel 6.14. Ringkasan perbandingan kedua cabang 92
Tabel 6.15. Bobot α optimal per kelas dan interpretasinya 99
Tabel 6.16. Hasil evaluasi EM fusion per-class pada data test 100
Tabel 6.17. IoU per Kelas: RGBD vs Edge-Depth vs EM Fusion 101
Tabel 6.18. IoU per Kelas pada Data Test: RGBD vs Edge-Depth vs CSSF 105
Tabel 6.19. Ringkasan metrik evaluasi seluruh metode 108
Tabel 6.20. Hasil ablasi komponen arsitektur CSSF (RGBD kanal) 113
Tabel 6.21. Perbandingan metode pada dataset BRSD 114