Deteksi Strabismus Berbasis Convolutional Neural Network dengan Mekanisme Attention dan Evaluasi
Interpretabilitas Menggunakan Gradient-Weighted Class Activation Mapping
Novanda Havid Ramadani, Dr.Eng. Ir. Sunu Wibirama, S.T., M.Eng., IPM.;Dr.Eng. Ir. Igi Ardiyanto, S.T., M.Eng., IPM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ii
DEWAN PENGUJI iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
HALAMAN PERSEMBAHAN v
KATA PENGANTAR vii
DAFTAR ISI viii
DAFTAR TABEL xii
DAFTAR GAMBAR xiv
DAFTAR SINGKATAN xv
INTISARI xvii
ABSTRACT xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 5
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Batasan Penelitian 6
1.5 Manfaat Penelitian 7
1.6 Sistematika Penulisan 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 9
2.1 Tinjauan Pustaka 9
2.1.1 Penelitian Terkait Deteksi Strabismus Berbasis *Deep Learning* 9
2.1.2 *Explainable AI* pada Citra Oftalmologi 11
2.1.3 Identifikasi *Research Gap* 12
2.1.4 Ringkasan *Gap* Penelitian 13
2.2 Dasar Teori 14
2.2.1 Strabismus 14
2.2.1.1 Klasifikasi Berdasarkan Arah Deviasi 15
2.2.1.2 Klasifikasi Berdasarkan Sifat Deviasi (Komitansi) 15
2.2.1.3 Klasifikasi Berdasarkan Manifestasi dan Onset 16
2.2.2 *Deep Learning* dan *Transfer Learning* 16
2.2.2.1 Kriteria Pemilihan Arsitektur CNN 17
2.2.2.2 EfficientNetB0 18
2.2.2.3 MobileNetV3Large 18
2.2.2.4 DenseNet121 19
2.2.2.5 ResNet50 20
2.2.2.6 VGG16 21

Deteksi Strabismus Berbasis Convolutional Neural Network dengan Mekanisme Attention dan Evaluasi
Interpretabilitas Menggunakan Gradient-Weighted Class Activation Mapping
Novanda Havid Ramadani, Dr.Eng. Ir. Sunu Wibirama, S.T., M.Eng., IPM.;Dr.Eng. Ir. Igi Ardiyanto, S.T., M.Eng., IPM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2.2.7 InceptionResNetV2 21
2.2.3 *Bayesian Hyperparameter Optimization* 22
2.2.4 Mekanisme *Attention* 24
2.2.4.1 *Squeeze-and-Excitation Network* (SENet) 25
2.2.4.2 Implikasi *Channel Attention* terhadap Grad-CAM 26
2.2.5 *Explainable Artificial Intelligence*: Grad-CAM 27
2.2.5.1 Formulasi Grad-CAM 27
2.2.5.2 Evaluasi Kuantitatif: DAUC dan IAUC 27
2.2.5.3 Metrik Lokalisasi Grad-CAM 28
2.2.6 *Preprocessing* Citra Klinis 29
2.2.6.1 Tahap 1: *Gaussian Denoising* 29
2.2.6.2 Tahap 2: *White Balance* 29
2.2.6.3 Tahap 3: CLAHE pada Ruang Warna LAB 30
2.2.6.4 Tahap 4: *Conservative Border Crop* 30
2.2.7 Penanganan Ketidakseimbangan Kelas 31
2.2.7.1 Prosedur *Split Anti-Leakage* 31
2.2.7.2 Augmentasi *Offline* sebagai *Oversampling* 31
2.2.8 Metrik Evaluasi Klasifikasi 31
2.2.9 Uji Statistik Perbandingan Model 32
2.2.9.1 Friedman Test 32
2.2.9.2 Wilcoxon *Signed-Ranks Test* + Koreksi Holm 32
2.2.9.3 McNemar's Test 32
2.3 Hipotesis Penelitian 33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 34
3.1 Pendahuluan 34
3.2 Alat dan Bahan Penelitian 34
3.2.1 Alat Penelitian 34
3.2.1.1 Perangkat Keras 34
3.2.1.2 Perangkat Lunak 35
3.2.2 Bahan Penelitian 35
3.2.2.1 Dataset 35
3.2.2.2 Analisis Distribusi Posisi Mata 37
3.2.2.3 Model Pretrained ImageNet (Keras Applications 2.15.0) 40
3.3 Kerangka Penelitian 40
3.4 Persiapan dan Pembagian Dataset 42
3.4.1 Pembagian Data Stratifikasi 42
3.4.2 Augmentasi *Offline* dan Cache 44
3.5 Pipeline Preprocessing Citra 44
3.5.1 Tahap 1: Gaussian Denoising 45

Deteksi Strabismus Berbasis Convolutional Neural Network dengan Mekanisme Attention dan Evaluasi
Interpretabilitas Menggunakan Gradient-Weighted Class Activation Mapping
Novanda Havid Ramadani, Dr.Eng. Ir. Sunu Wibirama, S.T., M.Eng., IPM.;Dr.Eng. Ir. Igi Ardiyanto, S.T., M.Eng., IPM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.5.2 Tahap 2: White Balance 45
3.5.3 Tahap 3: CLAHE pada Ruang Warna LAB 46
3.5.4 Tahap 4: Conservative Border Crop 46
3.5.5 Normalisasi Backbone 46
3.6 Arsitektur Model CNN dengan Mekanisme Attention 47
3.6.1 Desain Umum 47
3.6.2 Enam Backbone yang Dievaluasi 50
3.7 Desain Eksperimen 51
3.7.1 Eksperimen I: Evaluasi Kondisi Default 51
3.7.2 Eksperimen II: Bayesian HPO 51
3.7.3 Eksperimen III: Verifikasi Determinisme 53
3.8 Prosedur Pelatihan 53
3.8.0.1 Fase A: Backbone Frozen 55
3.8.0.2 Fase B: Fine-tuning Sebagian 56
3.8.0.3 Determinisme Lintas Fase Pelatihan 56
3.9 Evaluasi Performa Klasifikasi 57
3.10 Evaluasi Interpretabilitas dengan Grad-CAM 59
3.10.1 Motivasi dan Tujuan 59
3.10.2 Pembuatan Heatmap Grad-CAM 59
3.10.3 Metrik Faithfulness: DAUC dan IAUC 60
3.10.4 Metrik Lokalisasi Anatomis 61
3.11 Analisis Statistik 63
3.11.1 Friedman Test 63
3.11.2 Wilcoxon Signed-Ranks Test dan Koreksi Holm 64
3.11.3 McNemar's Test 64
3.11.4 Bootstrap Confidence Interval 64
3.12 Etika dan Keterbatasan Penelitian 66
3.12.1 Pertimbangan Etis 66
3.12.2 Keterbatasan 66
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 67
4.1 Eksperimen I: Evaluasi Kondisi Default 67
4.2 Eksperimen II: Implementasi Bayesian HPO 70
4.2.1 Hyperparameter Optimal yang Ditemukan 70
4.2.2 Hasil Setelah Optimasi 71
4.2.3 Perbandingan dengan Eksperimen I 72
4.3 Eksperimen III: Validasi Reprodusibilitas 75
4.4 Distribusi Posisi Mata pada Dataset dan Validasi Asumsi ROI 76
4.5 Analisis Interpretabilitas Grad-CAM 79
4.5.1 Visualisasi Grad-CAM: Gambaran Kualitatif 79

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Deteksi Strabismus Berbasis Convolutional Neural Network dengan Mekanisme Attention dan Evaluasi
Interpretabilitas Menggunakan Gradient-Weighted Class Activation Mapping**
Novanda Havid Ramadani, Dr.Eng. Ir. Sunu Wibirama, S.T., M.Eng., IPM.;Dr.Eng. Ir. Igi Ardiyanto, S.T., M.Eng., IPM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.5.2 Metrik Faithfulness: DAUC dan IAUC 82
4.5.3 Localization Score: Relevansi Area Perhatian 85
4.5.4 Perbandingan Langsung ResNet50 dan InceptionResNetV2 90
4.5.5 Konsistensi ResNet50 Lintas Eksperimen 92
4.6 Ringkasan Performa dan Rekomendasi 93
4.6.1 Ringkasan Performa Agregat 93
4.6.2 Rekomendasi Model 94
4.6.3 Kontribusi terhadap Permasalahan Klinis Strabismus di Indonesia 94
4.6.4 Jawaban atas Rumusan Masalah dan Hipotesis 95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 97
5.1 Kesimpulan 97
5.2 Saran 99
DAFTAR PUSTAKA 101
LAMPIRAN L-1
LAMPIRAN L-1
L.1 Implementasi Pipeline Preprocessing Citra L-1
L.2 Implementasi Augmentasi Offline dan Cache L-2
L.3 Implementasi Grad-CAM dan Metrik XAI L-3
L.4 Konfigurasi Bayesian HPO dengan KerasTuner L-6
L.5 Tabel Hasil Lengkap Semua Metrik L-7