

SKRIPSI
DETEKSI DAN ESTIMASI DIMENSI LUBANG JALAN
SECARA *REAL-TIME* BERBASIS *DEEP LEARNING*



Disusun untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh :

RISCHANTIKA BR. MANURUNG

03041282025075

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

LEMBAR PENGESAHAN

DETEKSI DAN ESTIMASI DIMENSI LUBANG JALAN SECARA *REAL-TIME* BERBASIS *DEEP LEARNING*



Disusun untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh :

RISCHANTIKA BR. MANURUNG

03041282025075

Palembang, 15 Juli 2024

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D., IPU.

NIP. 197108141999051005




Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T., M.S., IPM

NIP. 198407302008122001

HALAMAN PERNYATAAN DOSEN

Saya sebagai Pembimbing dengan ini menyatakan bahwa saya telah membaca dan menyetujui skripsi ini dan dalam pandangan saya ruang lingkup dan kualitas skripsi ini mencukupi sebagai skripsi mahasiswa sarjana strata satu (S1).

Tanda Tangan :  _____

Pembimbing Utama : Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T., M.S., IPM.

Tanggal : 15 Juli 2024

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rischantika Br. Manurung

NIM : 03041282025075

Fakultas : Teknik

Jurusan/Prodi : Teknik Elektro

Universitas : Universitas Sriwijaya

Hasil Pengecekan Software *iThenticate/Turnitin* : 1%

Menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul “**Deteksi dan Estimasi Dimensi Lubang Jalan Secara Real-Time Berbasis Deep Learning**” merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam karya ilmiah ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan tanpa paksaan.

Palembang, 13 Juli 2024



Rischantika Br. Manurung

NIM. 03041282025075

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, saya yang bertanda tangan di
bahwa ini :

Nama : Rischantika Br. Manurung

NIM : 03041282025075

Fakultas : Teknik

Jurusan/Prodi : Teknik Elektro

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada
Universitas Sriwijaya Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (Non-exclusive Royalty
Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**DETEKSI DAN ESTIMASI DIMENSI LUBANG JALAN SECARA *REAL-
TIME* BERBASIS *DEEP LEARNING***

beserta perangkat yang ada (jikas diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-
eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalihkan
media/fornatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat,
dan mempublikasikan tulisan saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap
mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak
Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Palembang

Pada Tanggal : 15 Juli 2024

Yang menyatakan,



Rischantika Br. Manurung

NIM. 03041282025075

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang selalu memberikan berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian berjudul “Deteksi dan Estimasi Dimensi Lubang Jalan Secara Real-Time Berbasis Deep Learning”.

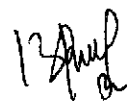
Tugas akhir ini dapat diselesaikan karena adanya dukungan, bimbingan, kritik, dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu penulis yang selalu memberikan dukungan dan doa.
2. Para kakak, abang, dan ponakan yang selalu membantu, memotivasi, dan memberikan semangat.
3. Ibu Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T., M.S., IPM., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu siap memberikan tenaga, waktu, dan pikiran dalam membimbing dan memberikan arahan selama penelitian.
4. Ibu Desi Windi Sari, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan saran dan arahan selama masa perkuliahan.
5. Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM., selaku dosen yang selalu memberikan tenaga, waktu, dan pikiran selama penelitian.
6. Teman-teman tim pothole detection yang telah bekerja sama untuk menyelesaikan penelitian.
7. Teman-teman grup TCK yang selalu memberikan dukungan.
8. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah berkontribusi dalam penulisan dan penelitian tugas akhir.

Penelitian ini dibuat dengan harapan bisa bermanfaat bagi para pembaca dan bisa menjadi referensi untuk pengembangan selanjutnya.

Palembang, 15 Juli 2024

Penulis



Rischantika Br. Manurung

ABSTRAK

DETEKSI DAN ESTIMASI DIMENSI LUBANG JALAN SECARA *REAL-TIME* BERBASIS *DEEP LEARNING*

(Rischantika Br. Manurung, 03041282025075, 2024, 59 halaman)

Deteksi dan estimasi dimensi lubang jalan secara *real-time* merupakan aspek penting dalam berbagai aplikasi, seperti pemeliharaan jalan dan keselamatan berkendara. Akan tetapi, pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya berfokus pada deteksi, atau estimasi dimensi, atau kombinasi keduanya, tetapi tidak dapat dilakukan secara *real-time*, sehingga pada penelitian ini dilakukan deteksi, estimasi dimensi (panjang dan lebar), dan estimasi jarak lubang secara *real-time*. *Dataset* yang digunakan terdiri dari berbagai bentuk dan ukuran lubang yang diambil di jalan Provinsi Sumatra Selatan dan Kota Palembang. Model YOLOv8x-seg dilatih sebanyak 50, 100, dan 200 *epochs* untuk menemukan konfigurasi terbaik. Hasil terbaik diperoleh pada pelatihan dengan 50 *epochs* dengan *box mean average precision* (mAP) sebesar 0.816 dan *box loss* sebesar 0.659. Pengujian secara simulasi menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu melakukan tugas deteksi, estimasi dimensi, dan estimasi jarak dengan nilai rata-rata *error width*, *height*, dan *distance* sebesar 13.88%, 19.85%, dan 24.55%. Kemudian, pada implementasi secara *real-time*, model dapat melakukan ketiga tugasnya dengan rata-rata *error width*, *height*, dan *distance* secara berurutan sebesar 11.44%, 15.57%, dan 12.24%. Hasil ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dapat digunakan secara efektif untuk pemantauan dan pemeliharaan jalan, serta mengurangi potensi bahaya yang mungkin terjadi di sekitar lubang, terutama di daerah Provinsi Sumatra Selatan dan Kota Palembang.

Kata kunci: Deteksi Lubang, Estimasi Dimensi, *Segmentation*, YOLO, *Real-Time*

ABSTRACT

A REAL-TIME POTHOLE DETECTION AND DIMENSION ESTIMATION BASED ON DEEP LEARNING

(Rischantika Br. Manurung, 03041282025075, 2024, 59 pages)

Real-time pothole detection and dimension estimation are crucial aspects of various applications, such as road maintenance and driving safety. However, previous studies only focused on detection, or dimension estimation, or a combination of both, but not in real-time. Therefore, in this study, the detection, dimension estimation, and distance estimation are combined in real-time. The dataset consists of various shapes and sizes of potholes taken from roads in the Province of Sumatra Selatan and the City of Palembang. The YOLOv8x-seg model was trained for 50, 100, and 200 epochs to find the optimal configuration. The best result was obtained with 50 epochs, achieving a box mean average precision (mAP) of 0.816 and a box loss of 0.659. Simulation testing showed that the developed model is capable of carrying out detection, dimension estimation, and distance estimation tasks with average errors for width, height, and distance of 13.88%, 19.85%, and 24.55%. Furthermore, real-time implementation showed that the model could perform all the tasks with average errors for width, height, and distance of 11.44%, 15.57%, and 12.24%. These results indicate that the developed model could be effectively used for road monitoring and maintenance, as well as reducing potential hazards around detected potholes, particularly in the Province of Sumatra Selatan and the City of Palembang.

Keyword: *Pothole Detection, Dimension Estimation, Segmentation, YOLO, Real-Time*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN DOSEN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR	
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Pembatasan Masalah	3
1.5 Keaslian Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>State of The Art</i> (SOTA).....	5
2.2 <i>Image Processing</i>	7
2.2.1 <i>Image Segmentation</i>	8
2.3 <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	9
2.4 <i>You Only Look Once</i> (YOLO).....	10
2.4.1 <i>Intersection Over Union</i> (IoU).....	12
BAB III METODE PENELITIAN	14
3.1 Studi Literatur.....	15
3.2 Pengumpulan <i>Dataset</i>	15
3.3 Perancangan Sistem.....	16
3.3.1 Pelatihan Model Deteksi	17
3.3.2 Komponen Pengambilan Data.....	17

3.4	Pengujian Sistem	18
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		21
4.1	Pengumpulan Data Latih	21
4.2	Pelabelan dan Pra-Pemrosesan Data	21
4.3	YOLOv8.....	22
4.3.1	Arsitektur YOLOv8	23
4.3.2	Pelatihan YOLOv8.....	24
4.4	YOLOv5.....	31
4.4.1	Arsitektur	32
4.4.2	Pelatihan YOLOv5.....	33
4.5	SAM	39
4.6	Perbandingan YOLOv8, YOLOv5, dan SAM	40
4.7	Pengujian YOLOv8 Secara Simulasi	42
4.7.1	Pengukuran Estimasi Dimensi Lubang	42
4.7.2	Pengukuran Jarak Lubang dengan <i>Depth Information</i>	46
4.8	Pengujian Keseluruhan Secara Simulasi	49
4.9	Pengujian Keseluruhan Secara <i>Real-Time</i>	53
4.10	Perbandingan Pengujian Model pada Lingkungan Lokal Komputer dan Aplikasi POTION AI.....	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Citra asli lubang [4].....	6
Gambar 2.2 Citra dengan format <i>black and white</i> [4].....	6
Gambar 2.3 Citra akhir [4]	6
Gambar 2.4 Hasil perbandingan YOLOv3 dan YOLOv4 [5]	7
Gambar 2.5 Hasil estimasi dimensi dari lubang yang terdeteksi [5].....	7
Gambar 2.6 Contoh <i>image segmentation</i> : (a) <i>semantic segmentation</i> ; (b) <i>instance segmentation</i> ; dan (c) <i>panoptic segmentation</i> [10]	9
Gambar 2.7 Arsitektur CNN [13].....	9
Gambar 2.8 Ilustrasi proses konvolusi [14]	10
Gambar 2.9 Arsitektur dasar YOLO [3]	11
Gambar 2.10 Ilustrasi algoritma YOLO [3].....	12
Gambar 2.11 Ilustrasi IoU [16]	13
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian	14
Gambar 3.2 Contoh data lubang jalan.....	15
Gambar 3.3 <i>Flowchart</i> sistem.....	16
Gambar 3.4 GoPro Hero 8	17
Gambar 3.6 Arduino Uno Rev.3, Atmega328P	18
Gambar 3.7 Ublox Neo-6M	18
Gambar 3.8 Rute pengujian.....	20
Gambar 4.1 Contoh data latih	21
Gambar 4.2 Anotasi data latih pada <i>website</i> Roboflow	22
Gambar 4.3 Arsitektur YOLOv8 [21].....	23
Gambar 4.4 Grafik metrik empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv8:.....	27
Gambar 4.5 Grafik <i>training loss</i> empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv8: (a) <i>Box loss</i> ; (b) <i>Segmentation loss</i>	28
Gambar 4.6 Grafik metrik ketiga model YOLOv8: (a) <i>Box mAP</i> ; (b) <i>Mask mAP</i> ; (c) <i>Box precision</i> ; (d) <i>Mask precision</i> ; (e) <i>Box recall</i> ; (f) <i>Mask recall</i>	30

Gambar 4.7 Grafik <i>training loss</i> empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv8: (a) <i>Box loss</i> ; (b) <i>Segmentation loss</i>	30
Gambar 4.8 Hasil pengujian YOLOv8 pada data citra: (a) 50 <i>epochs</i> ; (b) 100 <i>epochs</i> ; (c) 200 <i>epochs</i>	31
Gambar 4.9 Arsitektur YOLOv5 [21]	32
Gambar 4.10 Grafik metriks empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5:....	35
Gambar 4.11 Grafik <i>training loss</i> empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5: (a) <i>Box loss</i> ; (b) <i>Segmentation loss</i>	36
Gambar 4.12 Grafik metriks empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5: (a) <i>Box mAP</i> ; (b) <i>Mask mAP</i> ; (c) <i>Box precision</i> ; (d) <i>Mask precision</i> ; (e) <i>Box recall</i> ; (f) <i>Mask recall</i>	38
Gambar 4.13 Grafik <i>training loss</i> empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5: (a) <i>Box loss</i> ; (b) <i>Segmentation loss</i>	38
Gambar 4.14 Hasil pengujian YOLOv5 pada data citra: (a) 50 <i>epochs</i> ; (b) 100 <i>epochs</i> ; (c) 200 <i>epochs</i>	39
Gambar 4.15 Komponen SAM [22].....	40
Gambar 4.16 Koordinat <i>bounding box</i>	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 <i>Confusion matrix</i>	19
Tabel 4.1 Spesifikasi Google Colaboratory	24
Tabel 4.2 Variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv8.....	25
Tabel 4.3 Nilai metriks dari empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv8.....	26
Tabel 4.4 Nilai metriks terbaik dari setiap model	29
Tabel 4.5 Variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5	33
Tabel 4.6 Nilai metriks dari empat variasi <i>hyperparameter tuning</i> YOLOv5.....	34
Tabel 4.7 Nilai metriks terbaik dari setiap model	37
Tabel 4.8 Sampel gambar perbandingan model YOLOv8, YOLOv5, dan SAM .	41
Tabel 4.9 10 sampel hasil pengukuran panjang dan lebar	44
Tabel 4.10 10 sampel hasil pengukuran jarak.....	47
Tabel 4.11 10 sampel hasil pengujian keseluruhan secara simulasi	50
Tabel 4.12 10 sampel hasil pengujian keseluruhan secara <i>real-time</i>	54
Tabel 4.13 Perbandingan spesifikasi <i>local computer</i> dan <i>cloud server</i>	57
Tabel 4.14 Sampel gambar pada komputer lokal dan aplikasi POTION AI.....	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan prasarana penghubung yang digunakan untuk melakukan berbagai aktivitas. Dengan adanya jalan, manusia dapat mencapai suatu tempat, baik dengan kendaraan umum, pribadi, maupun berjalan kaki. Jalan berperan besar sebagai prasana dalam mobilitas. Kondisi jalan sangat dipengaruhi oleh kualitas jalan yang dibangun dan pemeliharannya. Jika kualitas dan pemeliharannya buruk, maka akan menyebabkan terjadinya kerusakan yang akan mempengaruhi kegiatan yang dilakukan.

Salah satu kondisi kerusakan jalan yang paling sering ditemukan adalah lubang. Lubang merupakan kondisi jalan yang tidak terawat, yang ditunjukkan dan didasari dengan adanya masalah struktural [1]. Keberadaan jalan berlubang tentunya dapat membuat perjalanan menjadi tidak nyaman, kerusakan pada kendaraan yang mengakibatkan biaya perbaikan tinggi, dan bahkan kecelakaan [1]. Namun, upaya yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan jalan berlubang saat ini masih secara manual sehingga pemantauan dan perawatan secara berkelanjutan memerlukan waktu, biaya, dan sumber daya yang tidak sedikit [2]. Untuk itu dibutuhkan metode yang lebih efektif dan efisien dalam mengatasi masalah tersebut, seperti deteksi jalan berlubang berbasis *computer vision*.

Metode *computer vision* dapat dimanfaatkan untuk melakukan deteksi objek secara *real-time*, seperti yang dilakukan oleh J. Redmon dkk [3]. Pada penelitian tersebut, *dataset* yang digunakan berupa video yang dikonversi menjadi kumpulan citra. Selanjutnya, *pre-processing* dilakukan pada kumpulan citra yang telah diperoleh, dengan tujuan memastikan citra-citra tersebut dalam keadaan yang sesuai untuk tahap pengolahan berikutnya [3]. Penelitian lain dilakukan oleh O. A. Egaji dkk yang membandingkan *random forest tree* (RFT), *support vector machine* (SVM), dan *k-nearest neighbors* (KNN) [1]. Selanjutnya, P. Ping dkk melakukan deteksi dan kalkulasi ukuran lubang melalui pelatihan *you only look once* versi 3 (YOLOv3), *histogram of oriented gradient* (HOG), *faster region-based convolutional neural network* (Faster R-CNN), dan *single shot detector*

(SSD) [4]. Pada penelitian lain, deteksi dan estimasi dimensi lubang dilakukan oleh P. A. Chitale dkk dengan membandingkan hasil dari algoritma YOLOv3 dan YOLOv4 [5]. Kemudian, A. Al-Shaghouri dkk membandingkan SSD-TensorFlow, YOLOv3-Darknet53, dan YOLOv4-CSPDarknet53 untuk mendeteksi *real-time* [6]. Sedangkan, P. Heitzmann mendeteksi dan mengklasifikasi kerusakan jalan secara *real-time* dengan melatih model YOLOv5 dan Faster R-CNN [7]. Pada penelitian lain digunakan algoritma YOLOv3 [8], YOLOX [9] dan CNN [2].

Dari sejumlah penelitian sebelumnya, *computer vision* telah diimplementasikan untuk mendeteksi lubang secara *real-time* [6]–[8], dimana YOLO menunjukkan hasil lebih unggul dari algoritma lainnya. Akan tetapi, penelitian-penelitian tersebut belum mempertimbangkan estimasi dimensi lubang yang meliputi panjang dan lebar, serta estimasi jarak lubang dari kamera. Padahal, informasi ini sangat diperlukan agar ukuran lubang yang perlu diperbaiki dapat diketahui. Untuk itu, pada penelitian ini digunakan YOLOv8 yang memiliki akurasi dan kecepatan lebih baik dari versi YOLO sebelumnya untuk mendeteksi serta memberikan estimasi dimensi dan estimasi jarak lubang secara *real-time*. Dengan demikian, kondisi jalan berlubang dapat digambarkan secara komprehensif sehingga pemantauan dan rencana perawatan dapat dilakukan dengan lebih efektif dan efisien.

1.2 Perumusan Masalah

Kondisi jalan berlubang banyak ditemukan akan tetapi proses deteksi, estimasi dimensi (panjang dan lebar), dan estimasi jarak lubang saat ini masih dilakukan secara manual dan terpisah, serta belum bersifat *real-time*. Oleh karena itu, penelitian ini memanfaatkan *computer vision* dengan pendekatan algoritma YOLOv8 untuk menjalankan seluruh proses tersebut secara *real-time*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi, estimasi dimensi (panjang dan lebar), dan estimasi jarak lubang secara *real-time* dengan pendekatan algoritma YOLOv8 sehingga pemantauan dan perawatan jalan

berlubang dapat dilakukan lebih efektif dan efisien, serta mengurangi potensi bahaya yang mungkin terjadi di sekitar lubang.

1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah terkait penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Deteksi dilakukan untuk objek berupa lubang jalan.
2. YOLO sebagai algoritma yang digunakan untuk mendeteksi dan memberikan estimasi dimensi lubang yang terdiri dari panjang dan lebar, serta estimasi jarak dari lubang yang terdeteksi ke kamera.
3. Pengumpulan data dan pengujian sistem dilakukan dengan GoPro Hero 8.
4. Data berupa video yang dikonversi menjadi kumpulan citra diambil di Jalan Kampung Bali, Sungai Dua hingga Jalan Sungai Kundur, Kab. Banyuasin, Sumatra Selatan, Jalan Kaca Piring, Jalan Swakarya I-II, Jalan Dwikora II, dan Jalan Ariodillah.
5. Data diambil dengan kondisi lubang kering (tidak tergenang air).
6. Model yang dikembangkan memiliki fokus utama pada penggunaan di lingkungan jalan aspal.
7. Pelatihan model dilakukan dengan Google Colab sebagai *platform cloud computing* berbasis Python.

1.5 Keaslian Penelitian

Pada beberapa tahun terakhir, *computer vision* untuk deteksi lubang telah digunakan dengan mengimplementasikan berbagai algoritma, O. A. Egaji dkk [1] dalam penelitiannya membandingkan *random forest tree* (RFT), *support vector machine* (SVM), dan *k-nearest neighbors* (KNN). Pada penelitian tersebut, data diambil melalui sejumlah perangkat, rute, dan mobil, serta dibagi menjadi tiga bagian (data latih, uji, dan validasi). Proses *pre-processing* data dilakukan dengan menggunakan *non-overlapping moving window* dalam interval 2 detik. Pada data latih diterapkan *stratified k-fold cross-validation* untuk mengukur kinerja model. Penelitian menunjukkan bahwa akurasi terbaik didapat pada RFT dan KNN, yaitu sebesar 89%. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada deteksi lubang dan belum dapat dilakukan secara *real-time*.

P. Ping dkk [4] melakukan deteksi dan kalkulasi ukuran lubang melalui pelatihan beberapa algoritma, yaitu *you only look once* versi 3 (YOLOv3), *histogram of oriented gradient* (HOG), *faster region-based convolutional neural network* (Faster R-CNN), dan *single shot detector* (SSD). Dari keempat algoritma yang telah dibandingkan, YOLOv3 lebih unggul dalam hal akurasi dan kecepatan deteksi, tetapi proses deteksi belum dilakukan secara *real-time*. Lubang yang terdeteksi selanjutnya dikonversi ke format *black and white* untuk dilakukan kalkulasi ukuran. Jarak lubang dan kamera akan mempengaruhi ukuran lubang yang terdeteksi sehingga *multiple regression* digunakan untuk memprediksi ukuran lubang sebenarnya.

YOLOv3 juga diteliti oleh Y. K. Yik dkk [8] untuk mendeteksi lubang secara *real-time* dengan *webcam*, dimana digunakan modul GPS VK-162 untuk menentukan lokasi lubang. Sebanyak 330 citra lubang digunakan untuk melatih model dengan 2000 *epochs* dan 0.001 *learning rate*. Lokasi lubang akan dibaca dan dicatat ke dalam file *Comma-Separated Values* (CSV) dan akan terus diperbarui ketika lubang terdeteksi. Setelah itu, *library* Bokeh dan Pandas digunakan untuk menerjemahkan lokasi lubang yang dicatat. Kemudian, lokasi akan divisualisasikan pada peta menggunakan Google Maps API. Penelitian ini telah melakukan deteksi *real-time*, tetapi hanya berfokus pada deteksi lubang.

Deteksi secara *real-time* juga dilakukan oleh A. Al-Shaghouri dkk [6] yang membandingkan SSD-TensorFlow, YOLOv3-Darknet53, dan YOLOv4-CSPDarknet53 dengan menggunakan 1087 *dataset* sekunder dan primer. Penelitian ini membuktikan bahwa deteksi secara *real-time* hanya bisa dilakukan dengan YOLO. Hal ini dikarenakan deteksi dengan algoritma SSD memiliki kecepatan yang rendah.

Deteksi lubang beserta estimasi dimensi telah dilakukan oleh P. A. Chitale dkk [5] menggunakan algoritma YOLOv3 dan YOLOv4. Pengolahan citra pada deteksi dari YOLOv4 menunjukkan hasil yang lebih unggul daripada YOLOv3. Kemudian, *triangular similarity measure* diimplementasikan untuk menentukan estimasi dimensi dari lubang yang terdeteksi. Penelitian ini telah mempertimbangkan estimasi dimensi lubang, tetapi belum dapat dilakukan secara *real-time*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. A. Egaji, G. Evans, M. G. Griffiths, and G. Islas, “Real-time machine learning-based approach for pothole detection,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 184, p. 115562, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115562.
- [2] R. Bharat, A. M. Ikotun, A. E. Ezugwu, L. Abualigah, M. Shehab, and R. A. Zitar, “A real-time automatic pothole detection system using convolution neural networks,” *Appl. Comput. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 750–757, 2023, doi: 10.54254/2755-2721/6/20230948.
- [3] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 779–788, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [4] P. Ping, X. Yang, and Z. Gao, “A Deep Learning Approach for Street Pothole Detection,” *Proc. - 2020 IEEE 6th Int. Conf. Big Data Comput. Serv. Appl. BigDataService 2020*, pp. 198–204, 2020, doi: 10.1109/BigDataService49289.2020.00039.
- [5] P. A. Chitale, K. Y. Kekre, H. R. Shenai, R. Karani, and J. P. Gala, “Pothole Detection and Dimension Estimation System using Deep Learning (YOLO) and Image Processing,” *Int. Conf. Image Vis. Comput. New Zeal.*, vol. 2020-Novem, 2020, doi: 10.1109/IVCNZ51579.2020.9290547.
- [6] R. A. S. B. Anas Al-Shaghouri, “Real-Time Pothole Detection Using Deep Learning,” *Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 1–10, 2021.
- [7] P. Heitzmann, “A Computer Vision-assisted Approach to Automated Real-Time Road Infrastructure Management,” 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2202.13285>
- [8] Y. K. Yik, N. E. Alias, Y. Yusof, and S. Isaak, “A real-time pothole detection based on deep learning approach,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1828, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1828/1/012001.
- [9] M. P. B and K. C. Sriharipriya, “Enhanced pothole detection system using YOLOX algorithm,” *Auton. Intell. Syst.*, 2022, doi: 10.1007/s43684-022-00037-z.

- [10] R. Szeliski, “Computer Vision : Algorithms and Applications 2nd Edition,” *Springer*, p. 1196, 2021.
- [11] S. Minaee, Y. Boykov, F. Porikli, A. Plaza, N. Kehtarnavaz, and D. Terzopoulos, “Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 44, no. 7, pp. 3523–3542, 2022, doi: 10.1109/TPAMI.2021.3059968.
- [12] S. Rahman, M. Ramli, F. Arnia, R. Muharar, M. Zen, and M. Ikhwan, *Convolutional Neural Networks Untuk Visi Komputer Jaringan Saraf Konvolusional untuk Visi Komputer (Arsitektur Baru, Transfer Learning, Fine Tuning, dan Pruning)*. Deepublish, 2021. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=_XxOEAAAQBAJ
- [13] S. Sumit, “A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks - the ELI5 way,” Towards Data Science. Accessed: Nov. 22, 2023. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>
- [14] M. Zufar and B. Setiyono, “Convolutional Neural Networks Untuk Pengenalan Wajah Secara Real-Time,” *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 5, no. 2, p. 128862, 2016.
- [15] E. C. Putro and R. M. Awangga, *Tutorial Gender Classification Using The You Only Looks Once (YOLO)*. in Computer Vision. Kreatif. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=bGUHEAAAQBAJ>
- [16] K. Kar, *Mastering Computer Vision with TensorFlow 2.x: Build advanced computer vision applications using machine learning and deep learning techniques*. Packt Publishing, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=nzDnDwAAQBAJ>
- [17] P. Pias, “Object Detection and Distance Measurement.” Accessed: Nov. 29, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/paul-pias/Object-Detection-and-Distance-Measurement>
- [18] F. A. Ardandy and S. Dwijayanti, “Deteksi Objek dan Jalan Secara Real Time untuk Kendali Kemudi pada Autonomous Electric Vehicle Berbasis Deep Learning,” 2023.
- [19] Roboflow, “Roboflow.” Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available:

<https://roboflow.com/>

- [20] Ultralytics, “Ultralytics YOLOv8 Docs.” Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/>
- [21] J. Terven, D. M. Córdova-Esparza, and J. A. Romero-González, “A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS,” *Machine Learning and Knowledge Extraction*, vol. 5, no. 4. pp. 1680–1716, 2023. doi: 10.3390/make5040083.
- [22] A. Kirillov *et al.*, “Segment Anything,” *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 3992–4003, 2023, doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00371.
- [23] “Konverter Piksel ke Cm.” Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.pixelconverter.com/id/konverter-piksel-ke-cm/#google_vignette