



Implementasi backbone CSPDarknet53 pada algoritma YOLOv4 sebagai sistem pendeteksi wajah manusia

Muhammad Rauf¹, Lisa Kristiana²

^{1,2}Institut Teknologi Nasional Bandung

muhammadrauf230@mhs.itenas.ac.id

Info Artikel :

Diterima :

7 Februari 2024

Disetujui :

16 Februari 2024

Dipublikasikan :

25 Februari 2024

ABSTRAK

Sistem pendeteksi wajah manusia merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan pada bidang komputer vision. Algoritma YOLOv4 merupakan algoritma yang dapat digunakan sebagai object detector. Algoritma YOLOv4 mampu mendeteksi secara realtime sebuah object benda termasuk pada wajah manusia. Algoritma YOLOv4 mempunyai beberapa struktur salah satunya adalah backbone yang akan digunakan pada penelitian ini. Backbone yang digunakan pada penelitian ini adalah CSPDarknet53. CSPDarknet53 merupakan struktur yang optimal sebagai ekstrasi fitur detector. Pada penelitian ini sistem pendeteksi wajah manusia dirancang menggunakan algoritma YOLOv4 dengan struktur backbone CSPDarknet53 yang dimana sistem ini diuji untuk mendapatkan nilai akurasi dan kecepatan respon deteksi dari jarak yang ditentukan. Hasil pengujian deteksi dan kecepatan respon mendapatkan nilai akurasi terbesar pada pengujian pendeteksian jarak 1meter dengan nilai akurasi sebesar 89.6% dan kecepatan respon sebesar 0.433 detik.

Kata Kunci: Wajah; YOLOv4; Backbone; CSPDarknet53

ABSTRACT

The human face detection system is a technology that is widely used in the field of computer vision. The YOLOv4 algorithm is an algorithm that can be used as an object detector. The YOLOv4 algorithm is able to detect objects in real time, including human faces. The YOLOv4 algorithm has several structures, one of which is the backbone that will be used in this study. The backbone used in this research is CSPDarknet53. CSPDarknet53 is an optimal structure for extraction of feature detectors. In this study a human face detection system was designed using the YOLOv4 algorithm with the CSPDarknet53 backbone structure in which the system was tested to obtain accuracy and response speed detection values from a specified distance. The results of the detection test and response speed get the greatest accuracy value in the 1m distance detection test with an accuracy value of 89.6% and a response speed of 0.433 second.

Keywords: Face; YOLOv4; Backbone; CSPDarknet53



©2022 Penulis. Diterbitkan oleh Arka Institute. Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang sangat cepat dapat mendorong adanya pengembangan teknologi yang lebih baik pula. Salah satu bidang pada pengembangan teknologi yang mengikuti arus perkembangan ini adalah teknologi pada bidang informatika. Salah satu teknik pada bidang informatika ini adalah teknik pengolahan citra (Abidin, 2018). Teknik pengolahan citra merupakan teknik yang digunakan untuk memanipulasi atau memodifikasi citra dengan berbagai cara untuk mendapatkan kualitas citra yang baik (Sulistyo, 2018). Proses pengolahan citra secara diagram proses dimulai dari pengambilan citra, perbaikan kualitas citra, sampai dengan pernyataan representatif citra yang dicitrakan (Ramli, 2021).

Salah satu pengolahan citra yang terdapat pada sistem kamera adalah sistem pendeteksian wajah. Sistem pendeteksian wajah manusia merupakan salah satu sistem yang terdapat pada komputer yang dapat mendeteksi wajah manusia (Bhanushree, 2020). Walaupun banyak dilakukan pengembangan sistem pendeteksian wajah manusia menggunakan algoritma yang berbeda beda, hasilnya masih jauh dari kata kesempurnaan.

Algoritma YOLO(You Only Look Once) merupakan algoritma yang didasarkan pada jaringan saraf convolutional yang sering digunakan untuk mengklasifikasikan object yang dideteksi

(Setyaningsih et al., 2022). Struktur pada algoritma ini terdiri dari beberapa bagian seperti backbone, neck dan head yang masing masing memiliki fungsi yang berbeda beda (Nurhasanah, 2022). Algoritma YOLOv4 yang digunakan pada penelitian ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan shot multibox detector pada pendeteksian object secara realtime dikarenakan algoritma YOLOv4 menghasilkan frame per second yang lebih besar dan memiliki ukuran model yang ringan. Pada metode YOLOv4 ini terdapat suatu struktur yang biasanya digunakan untuk mendeteksi object adalah CSPDarknet53.

Dalam penelitian Rezki Wulandari (2021) yang melakukan penelitian mengenai sistem deteksi dan pengenalan rambu lalu lintas dengan menggunakan framework darknet dengan model You Only Look Once version 4 (YOLOv4) dan sudah di tes secara realtime. Hasil mAP (mean Average Precision) pada sistem ini sebanyak 95.15%. Sedangkan Pada penelitian Eka Restu Justitian dkk yang melakukan penelitian mengenai akurasi deteksi kelelahan menunjukkan bahwa deteksi menggunakan YOLOv3 Tiny-realtime memiliki nilai akurasi hingga 97,3%. Sedangkan dengan menggunakan YOLOv4 Tiny real-time memberikan nilai akurasi hingga 97,3%. YOLOv4 memiliki tingkat akurasi yang baik dengan *frame per second (fps)* yang tinggi.

Berdasarkan hasil dari penjelasan diatas, pada penelitian ini bertujuan untuk menerapkan sistem pendeteksian wajah menggunakan algoritma YOLOv4 dengan struktur backbone CSPDarknet53 untuk mendapatkan nilai akurasi deteksi dan juga kecepatan respon deteksi dengan jarak 1 sampai 3 meter. Sistem ini dirancang menggunakan dan memanfaatkan perangkat keras berupa komputer dan webcam yang dapat diprogram menggunakan software development kit yang terdapat pada pemrograman python.

METODE PENELITIAN

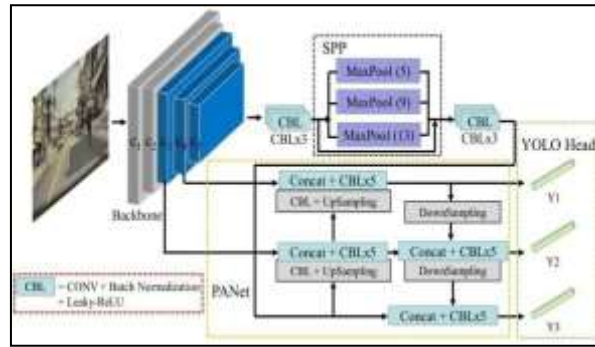
Pada penelitian ini dataset yang digunakan berasal dari Kaggle.com/human-face. Jumlah citra yang dilatih pada algoritma YOLOv4 struktur CSPDarknet53 menggunakan 150 citra wajah. Penggunaan dataset 150 citra wajah untuk dilatih merupakan jumlah minimum dataset untuk menghasilkan akurasi yang baik dengan nilai akurasi $\pm 80\%$ pada saat melakukan pendeteksian wajah dari jarak 1meter sampai 3meter.



Gambar 1. Dataset Latih YOLOv4

YOLOv4

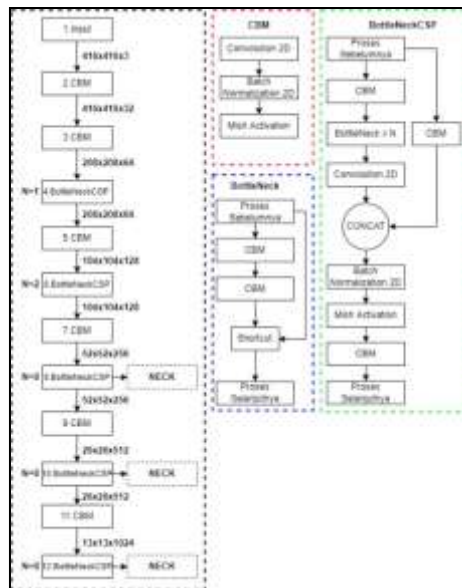
YOLO (You Only Look Once) merupakan salah satu pendeteksi objek single- stage (Thoriq, 2023). Deteksi objek dilakukan dengan melihat masalah tersebut sebagai masalah regresi untuk memisahkan secara spasial bounding box dan kelas probabilitas yang terkait terhadap bounding box tersebut. Sebuah neural network memprediksi bounding box dan kelas prediksi langsung dari keseluruhan citra dari satu evaluasi (Redmon et al., 2015). YOLOv4 merupakan versi terbaru yang dikembangkan oleh (Bochkovskiy et al., 2020) yang menambahkan sejumlah implementasi tambahan yang meningkatkan akurasi dan efisiensi pendeteksian.



Gambar 2. Struktur YOLOv4

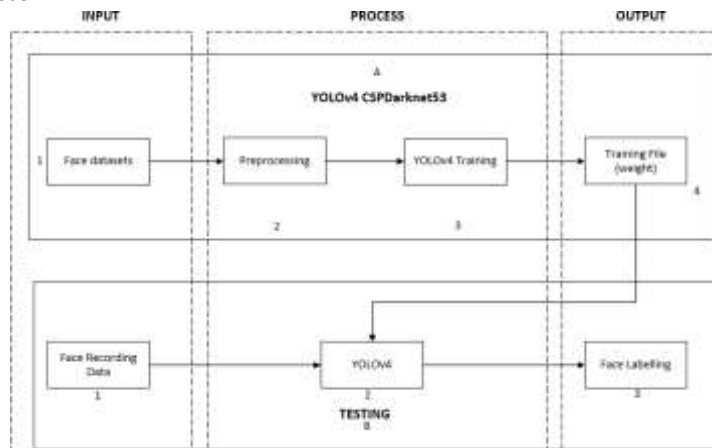
CSPDarknet53

CSPDarkNet53 adalah default backbone dari algoritma YOLO versi 4 (Dai, 2022). Backbone ini merupakan pengembangan dari backbone pada YOLO versi 3 yaitu DarkNet53 yang ditambahkan fitur Cross Stage Partial Connections (CSP) yang mengintegrasikan feature map dari tahap awal hingga tahap akhir jaringan. Implementasi CSP mengurangi komputasi sebanyak 20% sehingga mengungguli arsitektur backbone state-of-the-art lainnya (Bochkovskiy et al., 2020).



Gambar 3. Struktur CSPDarknet53

Block Diagram System



Gambar 4. Block Diagram Sistem

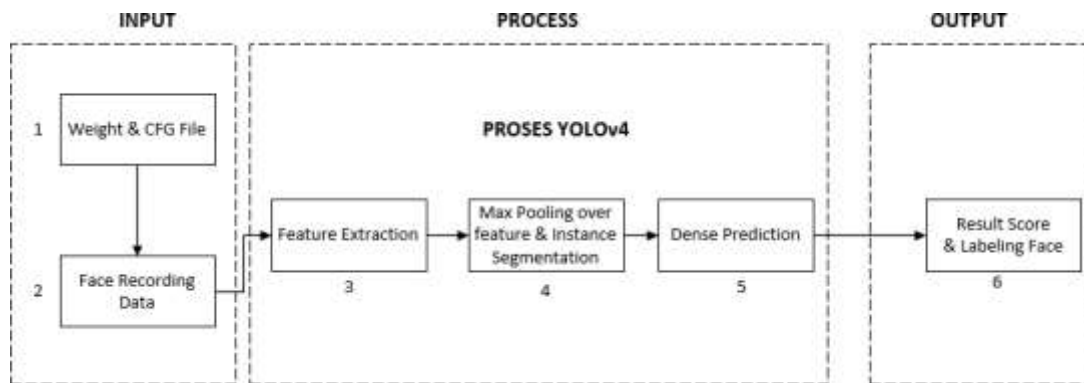
Pada block diagram dijelaskan system yang menggunakan algoritma YOLOv4 yang berfungsi untuk mendeteksi wajah. Berdasarkan pada gambar diatas terdapat beberapa tahapan perancangan sistem block diagram, sebagai berikut:

a. Bagian Training Data

1. Pada masukan point 1, disiapkan kumpulan gambar yang sudah di label wajah untuk ditraining.
2. Pada proses point 2 dan 3, dilakukan training YOLOv4 menggunakan google colab.
3. Pada hasil keluaran point 4, didapatkan berkas wight untuk YOLOv4 yang merupakan hasil dataset yang dapat digunakan untuk melakukan deteksi.

b. Bagian Testing

1. Pada masukan point 1, terdapat beberapa data yang berupa video wajah yang ditangkap pada kamera yang nantinya akan diuji.
2. Pada proses point 2 YOLOv4, dilakukan pendeteksian menggunakan yolov4 dibandingkan dan diproses dari berkas weight yolov4 yang sudah dilakukan hasil data pelatihnannya, proses ini membandingkan apakah data video yang diambil dari kamera merupakan wajah atau bukan.
3. Pada hasil face labelling 4, didapatkan sebuah hasil pelabelan bahwa proses yang diklasifikasi adalah wajah.



Gambar 5. Block Diagram Proses YOLOv4

Pada block diagram dijelaskan system yang menggunakan metode YOLOv4 yang berfungsi untuk mendeteksi wajah pada saat terjadinya input data. Berdasarkan pada gambar diatas terdapat bagian dari proses klasifikasi YOLOv4 sebagai berikut:

1. Pada masukan point 1 dan 2, terdapat hasil file weight dan cfg training yolov4 dan data rekaman wajah yang diambil dari drone untuk diproses ke haar cascade.
2. Pada proses point 3, 4 dan 5, dilakukan proses Feature extraction yang berfungsi sebagai pengambilan ciri dari bentuk hasil data latih dan uji yang nantinya nilai ciri yang didapat akan dianalisis, dan diproses pada max pooling untuk dikembalikan nilai maksimum dari bagian data latih. Dan pada instance object adalah penggabungan antar class yang sama. Dan dense prediction adalah proses penambahan layer dari penggabungan antar class apakah data uji yang diproses tersebut sesuai dengan data yang sudah dilatih
3. Pada hasil keluaran point 6, didapatkan nilai letak wajah yang dideteksi.

Rumus Akurasi YOLOv4

Akurasi adalah sebuah proses yang digunakan untuk mencari tingkat keberhasilan dari suatu metode. Pada YOLOv4 digunakan pengecekan tingkat akurasi dengan menggunakan Confusion Matrix, yang dimana confusion matrix ini dapat digunakan sebagai pengukuran performa untuk masalah dari klasifikasi (Hasman, 2021) dengan menggunakan sebuah rumus:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} * 100\% \quad (1)$$

Akurasi: Rasio prediksi yang benar terhadap total semua data yang telah diuji, dengan menggunakan rumus.

Deskripsi Rumus:

- TP/True Positive adalah prediksi objek yang dideteksi adalah wajah dan merupakan objek wajah yang sebenarnya.
- TN/True Negative adalah prediksi objek yang terdeteksi bukan wajah dan bukan objek wajah.
- FP/False Positive adalah prediksi bahwa objek yang terdeteksi adalah objek wajah dan ternyata prediksi tersebut salah, ternyata objek tersebut bukan wajah.
- FN / False Negative adalah prediksi bahwa objek yang dideteksi bukan objek wajah dan ternyata prediksi tersebut salah, ternyata objek tersebut adalah wajah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan Akurasi YOLOv4

Pengujian dilakukan dengan metode YOLO yang dimana pada pengujian ini membutuhkan waktu rata rata 15.2 detik untuk memproses jalannya program pada saat dieksekusi ke perangkat komputer dan perangkat kamera dilakukan pengambilan gambar dari beberapa angel yang ditunjukkan pada gambar. Dapat dilihat pada hasil pengujian metode YOLO dengan beberapa angel yang ditentukan bahwa metode ini mendeteksi wajah dengan baik, tetapi fps yang didapat begitu rendah yaitu rata rata 6 fps.



Gambar 6. Hasil Deteksi Wajah Manusia

Pengujian untuk mendapatkan tingkat akurasi metode YOLO menggunakan confusion matrix yang dimana terdapat sebuah video hasil deteksi wajah yang terdapat hasil akurasi deteksi didalamnya. Pengujian dilakukan dengan jarak 1 sampai 4 meter dikarenakan dataset yang dilakukan training menggunakan 150 citra yang menghasilkan akurasi kurang lebih 80% dengan jarak 1 sampai 3 meter dan 10 kali pengujian secara realtime untuk mendapatkan nilai minimum akurasi.

Tabel 1. Hasil Uji akurasi deteksi wajah menggunakan YOLOv4

Jarak	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Uji 4	Uji 5	Uji 6	Uji 7	Uji 8	Uji 9	Uji 10	Rata- rata
1 Meter	91%	91%	87%	90%	89%	88%	90%	87%	91%	92%	89.6%
1.5 Meter	89%	85%	87%	88%	83%	86%	87%	81%	82%	88%	85.6%
2 Meter	80%	81%	79%	81%	82%	82%	79%	80%	78%	80%	79.6%
2.5 Meter	76%	76%	73%	75%	78%	76%	75%	76%	74%	76%	75.5%
3 Meter	72%	75%	76%	70%	72%	75%	74%	74%	69%	70%	72.7%
3.5 Meter	65%	68%	66%	65%	65%	65%	67%	65%	65%	64%	65.5%
4 Meter	60%	63%	60%	62%	59%	62%	59%	57%	60%	59%	60.1%

Pada table 1 merupakan hasil pengujian akurasi dari setiap kondisi jarak 1 sampai 4 meter yang dimana terdapat nilai rata rata terbesar pada kondisi jarak 1 meter dengan nilai rata rata 89.6%. dan nilai rata rata akurasi terkecil terdapat pada kondisi jarak 4 meter dengan nilai rata rata dalah 60.1%.

Hasil Perhitungan Kecepatan Respon Deteksi YOLOv4

Tabel 2. Hasil uji kecepatan respon deteksi wajah menggunakan YOLOv4

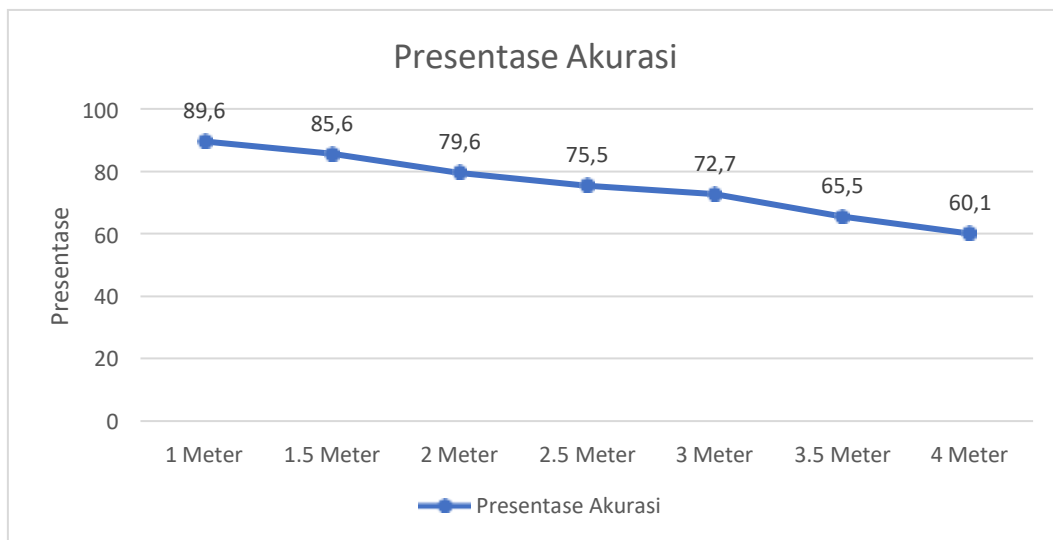
Jarak	Deteksi 1	Deteksi 2	Deteksi 3	Deteksi 4	Deteksi 5	Rata- rata
1 Meter	0.437	0.422	0.441	0.429	0.436	0.433 detik
1.5 Meter	0.494	0.489	0.515	0.502	0.498	0.4996 detik
2 Meter	0.617	0.625	0.621	0.609	0.618	0.6286 detik

Jarak	Deteksi 1	Deteksi 2	Deteksi 3	Deteksi 4	Deteksi 5	Rata- rata
2.5 Meter	0.784	0.812	0.819	0.796	0.803	0.8028 detik
3 Meter	0.986	0.979	0.981	0.983	0.976	0.981 detik
3.5 Meter	1.103	1.120	1.098	1.109	1.191	1.1242 detik
4 Meter	1.463	1.479	1.424	1.478	1.459	1.4606 detik

Pada table 2 merupakan hasil pengujian kecepatan respon deteksi dari setiap kondisi jarak 1 sampai 4 meter yang dimana terdapat nilai rata rata waktu tercepat pada kondisi jarak 1 meter dengan waktu rata rata 0.433 detik. dan nilai rata rata waktu terlama terdapat pada kondisi jarak 4 meter dengan waktu rata rata dalah 1.4606 detik.

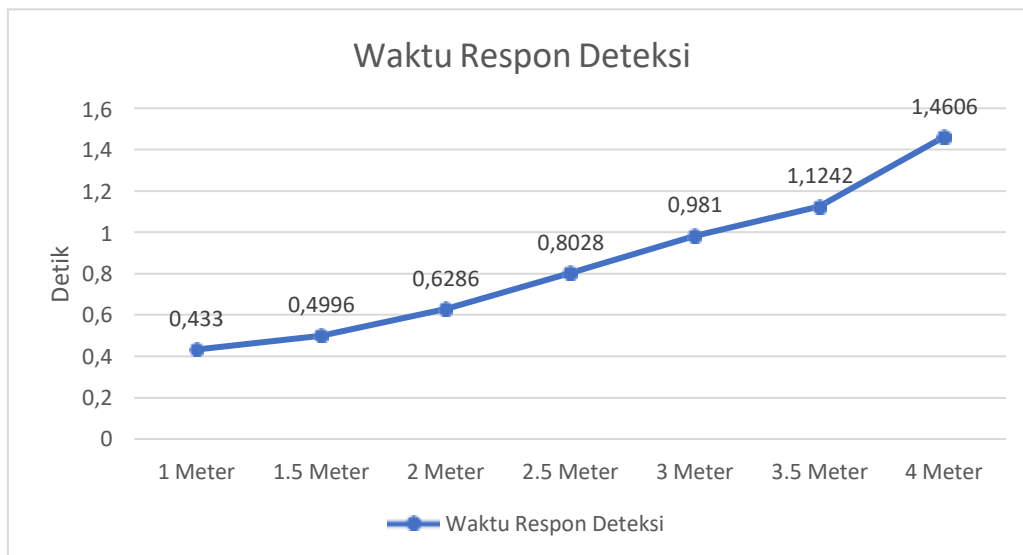
Hasil Analisa Perhitungan Akurasi dan Kecepatan Respon Deteksi YOLOv4

Dilakukan analisa algoritma YOLOv4 yang digunakan untuk menentukan seberapa akurat dan efektif pengguna algoritma YOLOv4 pada saat mendeteksi object wajah dalam jarak yang sudah ditentukan, kecepatan pada saat mendeteksi sebuah object wajah.



Gambar 7. Grafik Hasil Perhitungan Akurasi

Dari gambar 7 adalah grafik yang memiliki nilai akurasi dari setiap kondisi. Mulai yang dari kondisi jarak 1 meter mendapatkan rata rata nilai akurasi 89.6%, pada jarak 1.5 meter mendapatkan nilai akurasi 85.6%, pada jarak 2meter mendapatkan nilai akurasi 79.6%, pada jarak 2,5 meter mendapatkan nilai akurasi 75.5%, pada jarak 3meter mendapatkan nilai akurasi 72.7%, pada jarak 3,5 meter mendapatkan nilai akurasi 65.5%, dan pada jarak 4 meter mendapatkan nilai akurasi 60.1%. dapat disimpulkan bahwa nilai akurasi menurun sekitar 4% dari selisih jarak 50 cm.



Gambar 8. Grafik Hasil Perhitungan Kecepatan Respon Deteksi

Berdasarkan grafik pada gambar 8, diketahui bahwa dalam jarak 1 meter rata-rata waktu yang diperlukan untuk respon deteksi adalah 0,433 detik. Kemudian untuk jarak 1,5 meter memerlukan rata-rata waktu 0,4996 detik. Selanjutnya dalam jarak 2 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi sebesar 0,6286 detik. Pada jarak 2,5 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi 0,8028 detik. Sedangkan pada jarak 3 meter rata-rata waktu respon deteksi semakin besar yaitu 0,981 detik. Lalu pada jarak 3,5 meter dan 4 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi sebesar 1,1242 dan 1,4606. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak objek deteksi dengan alat deteksi akan memerlukan waktu lebih lama dalam merespon deteksi atau semakin dekat jarak objek deteksi maka respon deteksi akan semakin cepat.

Pembahasan

Analisa algoritma YOLOv4 digunakan untuk menentukan seberapa akurat dan efektif pengguna algoritma YOLOv4 pada saat mendeteksi object wajah dalam jarak yang sudah ditentukan, kecepatan pada saat mendeteksi sebuah objek wajah. Pada hasil pengujian metode YOLO dengan beberapa angel yang ditentukan bahwa metode ini mendeteksi wajah dengan baik, tetapi fps yang didapat begitu rendah yaitu rata rata 6 fps. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada algoritma YOLOv4 CSPDarknet53 didapatkan akurasi untuk jarak 1 meter adalah 89,6%. Kemudian untuk jarak 1,5 meter akurasi yang didapat adalah 85,6%. jarak 2 meter adalah 79,6%, jarak 2,5 meter adalah 75,5%, jarak 3 meter adalah 72,7%, jarak 3,5 meter adalah 65,5%, jarak 4 meter adalah 60,1%, dan jika digabungkan maka mendapatkan akurasi 52,86%.

Kemudian untuk perhitungan kecepatan respon deteksi, Waktu kecepatan respon deteksi yang didapatkan algoritma YOLOv4 CSPDarknet53 pada jarak 1 meter adalah 0,433 detik. Kemudian untuk jarak 1,5 meter memerlukan rata-rata waktu 0,4996 detik. Selanjutnya dalam jarak 2 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi sebesar 0,6286 detik. Pada jarak 2,5 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi 0,8028 detik. Sedangkan pada jarak 3 meter rata-rata waktu respon deteksi semakin besar yaitu 0,981 detik. Lalu pada jarak 3,5 meter dan 4 meter memiliki rata-rata kecepatan respon deteksi sebesar 1,1242 dan 1,4606. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak objek deteksi dengan alat deteksi akan memerlukan waktu lebih lama dalam merespon deteksi atau semakin dekat jarak objek deteksi maka respon deteksi akan semakin cepat.

Berdasarkan hasil penelitian yang didapat maka jarak menentukan akurasi dan kecepatan respon dalam mendeteksi objek. Semakin dekat jarak objek dengan alat deteksi, maka akan semakin tinggi akurasi dan kecepatan dalam respon deteksi. Begitu pun sebaliknya, semakin jauh jarak objek dengan alat deteksi maka akan semakin rendah akurasi yang didapat oleh alat deteksi dan semakin lama respon deteksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka dapat disimpulkan bahwa nilai akurasi deteksi pada sistem pendeteksi wajah manusia menggunakan YOLOv4 model CSPDarknet53 menurun sekitar 4% dari selisih jarak 50 cm. dan mendapatkan nilai akurasi terbesar pada jarak 1 meter dengan nilai akurasi sebesar 89.6%. Dan kecepatan respon deteksi juga mengalami kenaikan dikarenakan adanya perbedaan jarak. Pada kecepatan respons deteksi mendapatkan waktu terkecil atau tercepat pada pendeteksian jarak 1 meter yaitu dengan waktu 0.433 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, S. (2018). Deteksi Wajah Menggunakan Metode Haar Cascade Classifier Berbasis Webcam Pada Matlab. *Jurnal Teknologi Elektroika*. 2018, Volume 15 (1): 21-27.
- Arief, R. W. (2021). Sistem Deteksi dan Pengenalan Rambu Lalu Lintas Di Indonesia Menggunakan Algoritma YOLOv4= Traffic Sign Detection and Recognition System in Indonesia Using the YOLOv4 Algorithm (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Bhanushree K. J., M. M. (2020). Feature Based Face Recognition using Machine. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 1-5.
- Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. *CoRR*, abs/2004.1. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- Dai, T., Cong, S., & Zhang, J. (2022). Microscopic image recognition method of stomata in living leaves based on improved YOLO-X. *Research Square*.
- Hasman, E. P. (2021). Haar Cascade dan Algoritma Eigenface Untuk Sistem Pembuka Pintu Otomatis. *JSAI : Journal Scientific and Applied Informatics*.
- Justitian, E. R., Purbasari, I. Y., & Anggraeny, F. T. (2022). Perbandingan Akurasi Deteksi Kelelahan pada Pengendara Menggunakan YOLOv3-Tiny YOLOv4-Tiny. *Jurnal Informatika dan Sistem Informasi*, 3(1), 21-30.
- Koeh, K. E. (2020). Object Detection Metrics With Worked Example. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/on-object-detection-metrics-with-worked-example-216f173ed31e>
- Nurhasanah, Y. I., & Admaja, A. D. (2022). Perbandingan Pengenalan Huruf Bahasa Isyarat Indonesia (Bisindo) Secara Real Time Menggunakan Algoritma Yolov3 Dan Yolov4. *FTI*.
- Redmon, J., Divvala, S. K., Girshick, R. B., & Farhadi, A. (2015). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *CoRR*, abs/1506.0. <http://arxiv.org/abs/1506.02640>
- Ramli, A., Salamah, K. S., & Yuliza, Y. (2021). Perancangan Sistem Conformal Coating Inspection Circuit Board Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan Berbasis Matlab. *Jurnal Teknologi Elektro*, 12(2), 50-58.
- Setyaningsih, E. R., & Edy, M. S. (2022). YOLOv4 dan Mask R-CNN Untuk Deteksi Kerusakan Pada Karung Komoditi. *Teknika*, 11(1), 45–52. <https://doi.org/10.34148/teknika.v11i1.419>
- Sulistyo, W. Y., Riadi, I., & Yudhana, A. (2018, November). Analisis Deteksi Keaslian Citra Menggunakan Teknik Error Level Analysis Dengan Forensicallybeta. In *Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF)* (Vol. 1, No. 1).
- Thoriq, M. Y. A., Siradjuddin, I. A., & Permana, K. E. (2023). Deteksi Wajah Manusia Berbasis One Stage Detector Menggunakan Metode You Only Look Once (YOLO). *Jurnal Teknoinfo*, 17(1), 66-73.
- Wang, C., Zhou, Y., & Li, J. (2022). Lightweight Yolov4 Target Detection Algorithm Fused with ECA Mechanism. *Processes*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/pr10071285>