

## **Penerapan Computer Vision untuk Deteksi Perilaku Pengendara Sebagai Upaya Pencegahan Kecelakaan Lalu Lintas**

David Alif Tiano Putra, Elsa Aulia, Ghaita Tsuraya Shofa,  
Ibnu Ahmar Ihsanudin, Indria Nurputri Pratiwi, Intan Khalimatul Sa'diyah, dan Jalal  
Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Djuanda

### **Abstrak**

Kantuk pada pengendara merupakan penyebab dari 35% kecelakaan lalu lintas di Indonesia (*Rahmat et al., 2023*). Dalam upaya mengatasi masalah ini, diperlukan upaya untuk mencegah pengendara larut dalam kantuknya. Teknologi *Computer Vision* menjadi salah satu solusi opsi untuk membangun sistem yang dapat mengenali tanda kantuk atau kelelahan pada pengendara. Pendeteksian kantuk menjadi salah satu upaya yang masih dikembangkan hingga saat ini dan telah banyak membuahkan inovasi dalam pengembangannya. Pada jurnal ini, akan diuraikan berbagai macam inovasi teknologi *Computer Vision* dan ke-efektifannya untuk dijadikan opsi dalam pengembangan pendeteksi kantuk pada pengendara.

**Kata kunci:** *Computer Vision, pendeteksi kantuk, kecelakaan lalu lintas*

### **PENDAHULUAN**

Kecelakaan lalu lintas merupakan krisis global yang membutuhkan perhatian serius karena berdampak signifikan terhadap kesehatan masyarakat, sosial, dan perekonomian dunia. Menurut data terbaru dari *World Health Organization* (WHO, 2024), sekitar 1,19 juta orang meninggal setiap tahun akibat kecelakaan lalu lintas di seluruh dunia. Lebih mengkhawatirkan lagi, cedera akibat kecelakaan lalu lintas merupakan penyebab utama kematian bagi anak-anak dan dewasa muda berusia 5–29 tahun. Beban

ini juga tidak terdistribusi secara merata; sekitar 92% dari total kematian global terjadi di negara-negara berpendapatan rendah dan menengah, meskipun negara-negara tersebut hanya memiliki sekitar 60% kendaraan di dunia (*World Health Organization, 2024*).

Meskipun faktor-faktor seperti kondisi jalan, cuaca, dan kerusakan kendaraan turut berperan, berbagai studi konsisten menunjukkan bahwa faktor manusia (*human error*) merupakan penyebab utama dari sebagian besar kecelakaan lalu lintas. Salah satu bentuk kesalahan manusia yang paling sering terjadi adalah perilaku mengemudi tidak aman (*unsafe driving behavior*), seperti mengantuk (*drowsiness*), perhatian teralihkan (*distracted driving*) karena penggunaan ponsel, serta kelelahan berkendara. Kondisi tersebut dapat menurunkan tingkat fokus, memperlambat waktu reaksi, dan menyebabkan hilangnya kendali kendaraan, yang pada akhirnya berujung pada kecelakaan fatal.

Upaya untuk mengurangi risiko tersebut perlu difokuskan pada pendeteksian dini (*early detection*) terhadap kondisi pengemudi. Salah satu pendekatan yang kini banyak dikembangkan adalah pemanfaatan teknologi *Computer Vision* dan *Deep Learning*. Dengan menggunakan kamera yang dipasang di dalam kendaraan, sistem ini dapat menganalisis ekspresi wajah, pola kedipan mata, dan gerakan kepala pengemudi secara *real-time*, sehingga mampu mendeteksi tanda-tanda kelelahan atau gangguan perhatian sebelum terjadi kecelakaan. Teknologi tersebut menjadi dasar bagi pengembangan *Driver Monitoring System* (DMS) yang berfungsi memantau perilaku pengemudi secara otomatis. Sistem tersebut dapat memberikan peringatan ketika pengemudi menunjukkan tanda-tanda kantuk, bahkan diintegrasikan dengan sistem keamanan canggih seperti *Advanced Driver Assistance System* (ADAS) untuk melakukan tindakan preventif seperti pengereman otomatis atau pengendalian kendaraan sementara. Dengan perkembangan pesat di bidang *Computer Vision* dan *Deep Learning*, penelitian tentang pendeteksian kantuk pengemudi menjadi semakin penting, tidak hanya sebagai upaya

teknologi, tetapi juga sebagai langkah nyata dalam menekan angka kecelakaan lalu lintas secara global. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang komprehensif untuk memahami berbagai metode, algoritma, dan sistem yang telah dikembangkan agar dapat menghasilkan solusi yang akurat, efisien, dan aplikatif di dunia nyata. Jurnal ini bertujuan untuk mengelompokan dan membandingkan teknologi Computer Vision yang dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pendeteksi dan pencegahan kantuk pada pengemudi.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan kualitatif deskriptif. Sumber data diperoleh dari artikel ilmiah dan jurnal penelitian yang relevan dengan topik Computer Vision dan diterbitkan lima tahun terakhir. Analisa dilakukan secara deskriptif dengan mengidentifikasi temuan-temuan utama dari setiap penelitian untuk ditarik kesimpulan umum.

## **PEMBAHASAN**

Seringkali, pengemudi yang kelelahan atau berkendara di malam hari mudah untuk terserang rasa kantuk. Namun, mereka memilih memaksakan diri untuk terus berkendara dalam kondisi tersebut. Hal itu dapat membahayakan bagi si pengemudi dan bahkan pengemudi lain disekitarnya. Maka diperlukan upaya preventif agar dapat mengurangi angka potensi kecelakaan lalu lintas.

### **3.1. Pendeteksi Kantuk**

Telah banyak dilakukan penelitian terkait upaya pendeteksian kantuk pada pengemudi yang sampai saat ini telah menghasilkan banyak metode, salah satu metode yang masih sangat populer adalah dengan menggunakan *Computer Vision*. Selain karena tidak intrusif terhadap pengemudi, metode berbasis visual juga menghasilkan data yang lebih akurat dan mudah untuk diterapkan. PERCLOS (*Persentage of Eye Closure*)

merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam berbagai penelitian untuk mendeteksi kantuk, yaitu dengan mengukur seberapa lama dan sering pengemudi menutup mata. Pada penerapannya, PERCLOS digunakan untuk mengukur persentase tertutup atau terbukanya mata, mata yang terbuka kurang dari 20% diklasifikasikan sebagai mata yang tertutup (*Takashi Abe., 2023*) sehingga dapat menjadi indikator ketika pengemudi mengalami kantuk dan dapat dilakukan alarm pencegahan kecelakaan. Keakuratan PERCLOS bergantung pada banyak faktor, seperti pencahayaan, resolusi kamera, dan posisi kepala sehingga keakurasiannya bisa menurun bila digunakan pada kondisi nyata. Masalah tersebut dapat diatasi dengan memadukannya dengan *Deep Neural Network* sehingga sistem belajar untuk bisa mengidentifikasi objek dan citra gambar dengan lebih baik dan lebih fleksibel terhadap kondisi yang berfarisai (*Rais et al., 2021*). *Convolutional Neural Network* (CNN) yang termasuk dalam *Deep Neural Network* sangat cocok digunakan dalam pemrosesan data visual (*Bhatt et al., 2021*). (*Lutfi et al., 2021*) telah membuktikan dalam percobaannya bahwa CNN mampu mengklasifikasikan mata tertutup dan terbuka dengan tingkat akurasi hingga 98% dan error 2.05%.

### 3.1.1. Facial Movement Detection

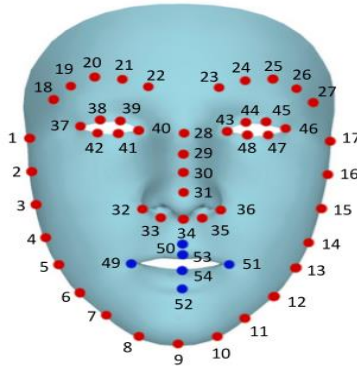
Salah satu cara untuk mendeteksi kantuk atau kondisi lelah pada pengemudi adalah dengan mengidentifikasi kondisi bagian-bagian dari wajah yang berbasis pada *micro-sleep patterns*, seperti kondisi mata, gerakan kepala, dan pergerakan mulut ketika menguap. *Eye Aspect Ratio* (EAR) dan *Mouth Open Ratio* (MOR) dapat menjadi acuan dalam menentukan tingkat kelelahan pada wajah. Dengan membandingkan perbedaan kondisi pada gambar di setiap framenya, sistem dapat mengidentifikasi kondisi dari pengemudi. Bila mata tertutup terlalu lama, sistem akan mengklasifikasikannya sebagai kondisi tertidur dan akan memberikan peringatan pada pengemudi agar tidak terjadi kecelakaan. Namun, jika hanya berpaku pada seberapa lebar mata terbuka, hal ini akan rentan terjadi kesalahan pada interpretasi dikarenakan tingkat terbukanya mata berbeda

pada setiap orang (Firdaus et al., 2023). Opsi yang bisa digunakan adalah dengan menggunakan *blink detection* sebagai basis pendeteksian kantuk. Durasi, frekuensi, dan jumlah kedipan dapat mengindikasikan terkait kelelahan dan konsentrasi (Kuwahara et al., 2022). Hal ini dapat menjadi patokan dalam mengidentifikasi kantuk pada pengendara melalui kedipan mata. Frekuensi normal seseorang berkedip pada kondisi normal berkisar 17 kali per menit dan paling sedikit 4-5 kali per menit. Kedipan juga bisa dipengaruhi banyak faktor lainnya, seperti ketika seseorang berkendara tentunya membutuhkan fokus untuk memegang kendali kendaraannya dan memberikan fokus lebih pada lingkungan sekitarnya. Maka frekuensi kedip ketika berkendara berkurang dengan rata-rata 8-10 kedipan per menit (Dewi et al., 2022). Dengan banyaknya faktor yang menentukan frekuensi kedip, diperlukan perbedaan spesifik antara kondisi normal dan ketika pengendara dalam kondisi mengantuk. Dengan mengumpulkan dataset dari berbagai tipe kedipan, akan semakin akurat dan semakin mudah algoritma EAR mengidentifikasi tipe kedipan. Pada percobaan yang dilakukan (Dewi et al., 2022) untuk mengukur keakuratan *Eye Aspect Ratio* (EAR) dalam mendeteksi kantuk pada pengendara secara real-time, dengan menggunakan Talking Face dan Eyeblink8 dataset, menghasilkan akurasi 97% pada penerapan EAR *threshold* 0,18.

### 3.1.2. Facial landmark

Wajah yang bergerak akan membuat karakteristik baru pada gambar sehingga sistem akan lebih banyak data untuk diproses dan membutuhkan kerja ekstra setiap pergantian posisi kepala (Navastara et al., 2020). Pada pemrosesan gambar, *facial landmark* bertugas untuk menetapkan titik-titik penting pada wajah, seperti mata, mulut, dan hidung. Pada algoritma Viola-Jones, terdapat fitur bernama *Haar Cascade Classifier* dimana bagian-bagian pada objek diklasifikasikan berdasarkan pada pola intensitas gelap terang pada objek. Setelah dilakukan *facial landmark*, *Haar Cascade* berperan untuk mengklasifikasikan titik mana yang paling penting pada wajah berdasarkan intensitas

cahaya. Titik-titik tersebutlah yang akan digunakan dalam pendeteksian kantung pengendara.



**Gambar 1. Contoh pengklasifikasian bagian wajah dengan facial landmark**  
 Sumber: <https://raw.githubusercontent.com/IS2AI/thermal-facial-landmarks-detection>

Pendeteksian bagian wajah, khususnya bagian mata, akan sulit dilakukan bila pengendara memakai kacamata, terlebih lagi kacamata hitam. (Kang & Ma, 2021) melakukan penelitian terkait pendeteksian pupil mata pada subjek yang menggunakan kacamata hitam dengan memperkirakan posisi pupil mata dengan menggunakan basis *facial landmark*. Dengan memberikan bobot lebih pada bagian *non-occluded* di wajah menggunakan modul *re-weight*, kalkulasi mengalami peningkatan akurasi sebesar 35% yang mana terbukti efektif dalam memperkirakan posisi pupil mata.

### 3.1.3. Dynamic Vision Sensor

Berbeda dengan alat visual konvensional lainnya, *Dynamic Vision Sensor* (DVS) tidak memroses gambar berdasarkan frame per frame atau mengirimkan gambar setiap waktu, melainkan berdasarkan pada perubahan intensitas cahaya di setiap piksel (Lv et al., 2021). *Dynamic Vision Sensor* (DVS) merupakan kamera neuromorfik yang pada dasarnya tidak merekam gambar berbasis frame per second, melainkan berbasis *event*. Ketika terjadi perubahan cahaya pada gambar, DVS akan mendeteksinya lalu mengirim data dalam bentuk *event stream* dan mengaktifkan *spike* untuk pemrosesan data. DVS

mengirimkan data secara *asynchronous* atau tidak berulang, data dikirim hanya ketika terjadi *event*. Berbeda dengan kamera biasa yang mengirimkan data visual berupa frame per frame setiap detiknya sehingga sistem selalu aktif yang mengakibatkan lebih boros dalam penggunaan energi. Karena mekanisme *spike* yang hanya aktif pada saat ada *event* yang terjadi, DVS menjadi alat deteksi objek yang *low-cost energy* dan komputasi yang lebih cepat. Dan karena pendeteksian objek tidak berbasis pada frame, DVS memiliki respon yang lebih cepat dengan mengidentifikasi perubahan pada intensitas piksel serta memiliki *dynamic range* yang lebih baik dibanding kamera konvensional. DVS memiliki tingkat keakuratan dalam pemrosesan dan pengklasifikasian gambar sebesar >95% (Alex et al., 2024) sehingga cocok untuk diterapkan dalam mendeteksi kantuk secara *real-time* pada pengendara. (Choi et al., 2025) melakukan percobaan untuk mendeteksi kantuk pada pengendara dengan menggunakan *Dynamic Vision Sensor* pada *Event-driven Blink Tracking System* (E-BTS) yang berfokus pada pendeteksian area sekitar mata dan kedipan berdasarkan data *event* yang didapat serta berfokus pada membangun sistem dengan daya rendah. Hasilnya, setelah percobaan diberbagai kondisi cahaya dan *noise*, keakuratan sistem berkisar 86% dengan hanya menggunakan 27,2% total kekuatan prosesor. Hal tersebut dapat menjadi acuan dalam membangun sistem pendeteksian kelelahan pada pengendara secara *real-time* yang efisien dan berdaya rendah.

Dalam pengolahan data berbasis *event*, diperlukan jaringan saraf buatan yang berbeda dari *Artificial Neural Network* konvensional seperti CNN (Vicente-Sola et al., 2024). DVS menggunakan *Spiking Neural Network* (SNN) untuk pengolahan data berbasis *event* berupa *event stream* dengan mekanisme *spiking*. SNN memiliki mekanisme yang sama dengan otak dalam pengolahan rangsangan informasi. Rangsangan berupa *spike* yang aktif bila ada *event* yang terjadi yang mana sangat cocok bila dikolaborasikan dengan *Dynamic Vision Sensor* dalam pengolahan data berbasis *event neuromorphic* (He et al., 2024). Karena kompleksitas dari data yang dihasilkan perangkat berbasis *event-driven*, banyak

penelitian dilakukan untuk mengembangkan SNN agar dapat mengolah data berbasis *event* dengan lebih baik lagi. Dengan menggunakan *Dynamic Tracking with Event Attention Spiking Network* (DTEASN), sebuah *framework* SNN, (Feng et al., 2025) dalam penelitiannya mendapat tingkat akurasi beragam tergantung pada dataset yang digunakan. Skor terendah yaitu 44,69% menggunakan dataset ES-ImageNet dan skor tertinggi yaitu 98,13% menggunakan dataset MNIST. Dengan menambahkan pada *event* yang bermakna menggunakan EW-SLoss (*Event Weighted Spiking Loss*) tingkat keakuratan dapat meningkat. Mekanisme ini sangat berguna untuk pengembangan alat pendeteksian kantuk pada pengemudi yang hemat daya dan minim latensi sehingga dapat mengurangi kesalahan interpretasi pada sistem dalam mendeteksi pengemudi yang tertidur saat berkendara.

### 3.2. Advanced Driver Assistance System

Dalam penerapannya, *Advance Driver Assistance System* (ADAS) dapat meningkatkan keamanan dan kenyamanan pengemudi (Neumann, 2024). ADAS merupakan bagian dari teknologi computer vision yang berfungsi untuk pengawasan pada kondisi pengemudi serta pendeteksian dan pelacakan kondisi sekitar mobil. Skema pencegahan kecelakaannya adalah ketika sistem mendeteksi ciri kantuk pada pengemudi, seperti gerakan kepala, menguap, kedipan mata, dan ekspresi pengemudi, sistem tidak hanya memberikan peringatan tetapi juga melakukan prosedur keamanan lainnya seperti mengerem otomatis atau menepi secara mandiri agar dapat mengurangi potensi kecelakaan (Chengula et al., 2024). Namun, ADAS masih sulit dalam melakukan pendeteksian pada kondisi cuaca yang buruk, perubahan cahaya pada objek, dan objek yang tumpang tindih. Dalam penelitian (Gutiérrez-Zaballa et al., 2023) untuk mengembangkan pemahaman lingkungan pada ADAS, mereka memadukan *hyperspectral imaging* (HSI) dengan *Fully Convolutional Network* (FCN) untuk mendapatkan segmentasi gambar yang lebih baik untuk pengembangan berkendara

otomatis (*autonomous driving*). Dengan menggunakan *hyperspectral imaging* (HSI), data reflektansi spektral yang didapat lebih beragam dengan jumlah ratusan dibandingkan kamera RGB pada umumnya. HSI dapat menangkap gelombang *near infrared* (NIR) sehingga sistem mendapatkan informasi tambahan untuk membedakan objek yang tampak serupa secara visual (Jon Gutiérrez-Zaballa et al., 2024). *Fully Convolutional Network* (FCN) berbeda dengan *Convolutional Neural Network* (CNN) yang hanya menghasilkan satu nilai klasifikasi pada outputnya. FCN menghasilkan output *spatial map* pada segmentasi citranya sehingga setiap piksel pada gambar diberikan label sesuai dengan nama objeknya. Arsitektur ini sangat cocok dengan HSI yang menangkap informasi spektral dalam jumlah banyak per pikselnya sehingga FCN bisa mengambil informasi piksel dan melebelinya pada gambar sesuai dengan spektrumnya (Liu et al., 2021). Memadukannya dengan ADAS akan menjadi solusi dalam pencegahan terjadinya kecelakaan yang disebabkan kelalaian pengemudi. Dan dengan skema sistem ini memungkinkan untuk pengembangan *automatic car* yang bisa membuat berkendara lebih aman ketika pengemudi sedang kelelahan atau mengantuk, sehingga dapat menurunkan angka kecelakaan.

## KESIMPULAN

Pada jurnanal ini telah dirangkum beberapa sistem deteksi kantuk berbasis *Computer Vision* dan *Deep Learning* yang mampu meningkatkan keamanan berkendara dalam upaya mengurangi angka kecelakaan lalu lintas. Dari penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa teknologi berbasis *Computer Vision* dapat menjadi opsi yang efektif, *low energy*, dan akurat dalam pendeteksian kantuk pada pengemudi. Namun, tetap diperlukan penelitian lebih lanjut terkait PERCLOS, CNN, Facial Landmark, DVS, dan ADAS berbasis HSI-FCN agar dapat memberikan hasil yang akurat, efisien, dan adaptif terhadap kondisi nyata. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat mengurangi

angka kecelakaan lali lintas yang disebabkan oleh kantuk pengemudi sekaligus menjadi langkah maju menuju sistem kendaraan cerdas (*smart vehicle*) di masa depan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abe, T. (2023). PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: current evidence and future directions. In *SLEEP Advances* (Vol. 4, Issue 1). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/sleepadvances/zpad006>
- Bhatt, D., Patel, C., Talsania, H., Patel, J., Vaghela, R., Pandya, S., Modi, K., & Ghayvat, H. (2021). Cnn variants for computer vision: History, architecture, application, challenges and future scope. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/electronics10202470>
- Chen, G., Hong, L., Dong, J., Liu, P., Conradt, J., & Knoll, A. (2020). EDDD: Event-Based Drowsiness Driving Detection through Facial Motion Analysis with Neuromorphic Vision Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 20(11), 6170–6181. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2973049>
- Chengula, T. J., Mwakalonge, J., Comert, G., Sulle, M., Siuhi, S., & Osei, E. (2024). Enhancing advanced driver assistance systems through explainable artificial intelligence for driver anomaly detection. *Machine Learning with Applications*, 17, 100580. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2024.100580>
- Choi, J., Choi, E., Choi, S., & Lee, W. (2025). E-BTS: A low-power Event-driven Blink Tracking System with hardware-software co-optimized design for real-time driver drowsiness detection. *Alexandria Engineering Journal*, 128, 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.020>

- Jon Gutiérrez-Zaballa, Koldo Basterreeta, Javier Echanobe, M. Victoria, & Ines del Campo. (2024). *Exploring fully convolutional networks for the segmentation of hyperspectral imaging applied to advanced driver assistance system\** (K. Desnos & S. Pertuz, Eds.; Vol. 13425). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-12748-9>
- Dewi, C., Chen, R. C., Jiang, X., & Yu, H. (2022). Adjusting eye aspect ratio for strong eye blink detection based on facial landmarks. *PeerJ Computer Science*, 8. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.943>
- Dhasarathan, C., Gnanasekaran, S., Pattanayak, A., Kumar, G., Vig, K., Narain, V., Deva Narayan, K. M., & Garg, S. (2025). Tensor RT optimized driver drowsiness detection system using edge device. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(10). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103620>
- Feng, B., Zhu, R., Zhu, Y., Jin, Y., & Ju, J. (2025). Dynamic Vision Sensor-Driven Spiking Neural Networks for Low-Power Event-Based Tracking and Recognition. *Sensors*, 25(19), 6048. <https://doi.org/10.3390/s25196048>
- Firdaus, A., Utamingrum, F., & Widasari, E. R. (2023). *Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi berbasis Eye Aspect Ratio dan Mouth Opening Ratio menggunakan Algoritme C-LSTM* (Vol. 7, Issue 2). <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Fu, B., Boutros, F., Lin, C.-T., & Damer, N. (2024). *A Survey on Drowsiness Detection -- Modern Applications and Methods*. <http://arxiv.org/abs/2408.12990>
- Gambar, P., Lamudur, G., & Sihombing, A. (n.d.). *Literature Review: Metode Jaringan Neural Konvolusi (CNN) Untuk*.
- Gutiérrez-Zaballa, J., Basterreeta, K., Echanobe, J., Martínez, M. V., Martínez-Corral, U., Mata-Carballeira, Ó., & del Campo, I. (2023). On-chip hyperspectral image

- segmentation with fully convolutional networks for scene understanding in autonomous driving. *Journal of Systems Architecture*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102878>
- Habibah, M. U., Kurniawan, M., & Korespondensi, P. (n.d.). *SEGMENTASI CITRA WAJAH DENGAN IMPLEMENTASI ADAPTIF THRESHOLD-INTEGRAL IMAGE FACE IMAGE SEGMENTATION WITH IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE THRESHOLD-INTEGRAL IMAGE*. <https://doi.org/10.25126/jtiik.202183840>
- He, X., Zhao, D., Li, Y., Shen, G., Kong, Q., & Zeng, Y. (2024). *An Efficient Knowledge Transfer Strategy for Spiking Neural Networks from Static to Event Domain*. <https://github.com/Brain-Cog-Lab/Transfer-for-DVS>.
- Hutamaputra, W., & Utaminingrum, F. (2021). *Implementasi Facial Landmark dalam Pengenalan Wajah pada Sistem Pembayaran Elektronik* (Vol. 5, Issue 5). <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Iddrisu, K., Shariff, W., & Little, S. (2024). *A Framework for Pupil Tracking with Event Cameras*. <http://arxiv.org/abs/2407.16665>
- Kang, D., & Ma, L. (2021). Real-Time Eye Tracking for Bare and Sunglasses-Wearing Faces for Augmented Reality 3D Head-Up Displays. *IEEE Access*, 9, 125508–125522. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110644>
- Kumar, P. (n.d.). *Face Detection By Open CV*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16043.31521>
- Kuwahara, A., Nishikawa, K., Hirakawa, R., Kawano, H., & Nakatoh, Y. (2022). Eye fatigue estimation using blink detection based on Eye Aspect Ratio Mapping(EARM). *Cognitive Robotics*, 2, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.01.003>

- Liu, Q., Wu, Z., Jia, X., Xu, Y., & Wei, Z. (2021). From local to global: Class feature fused fully convolutional network for hyperspectral image classification. *Remote Sensing*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/rs13245043>
- Lv, H., Feng, Y., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2021). Dynamic Vision Sensor Tracking Method Based on Event Correlation Index. *Complexity*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8973482>
- Mulyana, D. I., & Edi. (2023). PENERAPAN FACE RECOGNITION DENGAN ALGORITMA VIOLA JONES DALAM SISTEM PRESENSI KEHADIRAN SISWA DAN GURU PADA SEKOLAH IDN BOARDING SCHOOL JONGGOL. *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika Dan Komunikasi*, 4(3), 1749–1757. <https://doi.org/10.35870/jimik.v4i3.398>
- Nasir, O., Aljaidi, M., Alsarhan, A., Alshammari, S. A., Albalawi, N. S., Alshammari, N. H., & Aldoghmi, A. Q. (2025). SAFE-DRIVE-AI: A CNN–LSTM–Attention Framework for Drowsiness Detection. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(5), 27594–27600. <https://doi.org/10.48084/etasr.12725>
- Navastara, D. A., Putra, W. Y. M., & Fatichah, C. (2020). Drowsiness Detection Based on Facial Landmark and Uniform Local Binary Pattern. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/5/052015>
- Nazari, S., & Amiri, M. (2025). An accurate and fast learning approach in the biologically spiking neural network. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90113-0>
- Ravi, N., Gabeur, V., Hu, Y.-T., Hu, R., Ryali, C., Ma, T., Khedr, H., Rädle, R., Rolland, C., Gustafson, L., Mintun, E., Pan, J., Alwala, K. V., Carion, N., Wu, C.-Y., Girshick, R., Dollár, P., & Feichtenhofer, C. (2024). SAM 2: Segment Anything in Images and Videos. <http://arxiv.org/abs/2408.00714>

- Salman, R. M., Rashid, M., Roy, R., Ahsan, M. M., & Siddique, Z. (2021). *Driver Drowsiness Detection Using Ensemble Convolutional Neural Networks on YawDD*. <http://arxiv.org/abs/2112.10298>
- Salvati, L., D'amore, M., Fiorentino, A., Pellegrino, A., Sena, P., & Villecco, F. (2021). On-road detection of driver fatigue and drowsiness during medium-distance journeys. *Entropy*, 23(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/e23020135>
- Setiawan, R. A., Pradana, F., & Abdurrachman Bachtiar, F. (2021). *Pengembangan Aplikasi Pendeteksi Kelelahan bagi Pengendara Mobil berbasis Android melalui Face Recognition* (Vol. 5, Issue 11). <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Shen, S., Zhao, D., Shen, G., & Zeng, Y. (2024). *TIM: An Efficient Temporal Interaction Module for Spiking Transformer*. <http://arxiv.org/abs/2401.11687>
- Son, S. Bin, Park, S. H., & Lee, Y. K. (2024). A Comprehensive Study on Key Components of Grayscale-based Deepfake Detection. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 18(8), 2230–2252. <https://doi.org/10.3837/tiis.2024.08.010>
- Supiyandi Supiyandi, Andriani Sitorus, Nurul Fitriah, Havni Virul, & Syawaliah Putri Rangkuti. (2024). Pendeteksi Gerakan Pada Vidio Menggunakan Pyton dan OpenCV. *Merkurius : Jurnal Riset Sistem Informasi Dan Teknik Informatika*, 2(6), 334–343. <https://doi.org/10.61132/mercurius.v2i6.522>
- Supiyandi Supiyandi, Tegar Ardiansyah, Sri Putri Balqis, Jundi Haqqoni, & Salsa Nabila Iskandar. (2024). Deteksi Wajah dalam Foto Menggunakan Teknologi Visi Komputer. *Mars : Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 2(6), 32–39. <https://doi.org/10.61132/mars.v2i6.490>

- Venkateswarlu, M., & Chirra, V. R. R. (2025). CNN-ViT: A multi-feature learning based approach for driver drowsiness detection. *Array*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100425>
- Vicente-Sola, A., Manna, D. L., Kirkland, P., Di Caterina, G., & Bihl, T. (2024). *Spiking Neural Networks for event-based action recognition: A new task to understand their advantage*. <http://arxiv.org/abs/2209.14915>
- Vishnu, R., Vishvaragul, S., Srihari, P., Nithiavathy, R., & Asmitha Shree, R. (2021). Retraction: Driver drowsiness detection system with opencv and keras. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1916, Issue 1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1916/1/012172>
- Xiao, T., Singh, M., Mintun, E., Darrell, T., Dollár, P., Girshick, R., & Research, F. A. (n.d.). *Early Convolutions Help Transformers See Better*.
- Yuen, S. C. K., Zakaria, N. H. B., Su, G. E., Hassan, R., Kasim, S., & Sutikno, T. (2024). Real-time smart driver sleepiness detection by eye aspect ratio using computer vision. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 34(1), 677–686. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v34.i1.pp677-686>
- Dewi, C., Chen, R. C., Chang, C. W., Wu, S. H., Jiang, X., & Yu, H. (2022). Eye Aspect Ratio for Real-Time Drowsiness Detection to Improve Driver Safety. *Electronics (Switzerland)*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/electronics11193183>
- Neumann, T. (2024). Analysis of Advanced Driver-Assistance Systems for Safe and Comfortable Driving of Motor Vehicles. *Sensors*, 24(19). <https://doi.org/10.3390/s24196223>