

**PERANCANGAN SISTEM SMARTGLOVE-CAM: INTEGRASI FLEX-
IMU DAN WEBCAM YOLOV8 DENGAN VALIDASI GESTUR STATIS
UNTUK VISUALISASI TANGAN 3D REAL-TIME DI UNITY**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Program Studi S1 Teknik Elektro



Oleh:

Muhammad Syams Nurrohmat

E.5051.2100189

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNIK DAN INDUSTRI
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

2025

PERANCANGAN SISTEM SMARTGLOVE-CAM: INTEGRASI FLEX-IMU DAN WEBCAM YOLOV8 DENGAN VALIDASI GESTUR STATIS UNTUK VISUALISASI TANGAN 3D REAL- TIME DI UNITY

Oleh
Muhammad Syams Nurrohmah
E.5051.2100189

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam
memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro pada Program Studi S1 Teknik Elektro

© Muhammad Syams Nurrohmah
Universitas Pendidikan Indonesia
Agustus 2025

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difotokopi, atau cara lainnya tanpa izin dari penulis

LEMBAR PENGESAHAN

Muhammad Syams Nurrohmat

E.505.2100189

Perancangan Sistem SmartGlove-CAM: Integrasi Flex-IMU dan Webcam
YOLOv8 dengan Validasi Gestur Statis untuk Visualisasi Tangan 3D Real-
Time di Unity

Disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

Dosen Pembimbing



Dr. Erik Haritman, S.Pd., M.T.
NIP. 197605272001121002

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Didin Wahyudin, Ph.D.
NIP. 197608272009121001

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Syams Nurrohmah
NIM : 2100189
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Perancangan Sistem SmartGlove-CAM: Integrasi Flex-
IMU dan Webcam YOLOv8 dengan Validasi Gestur Statis
untuk Visualisasi Tangan 3D Real-Time di Unity

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulis ini merupakan hasil kerja saya sendiri. Saya menjamin bahwa seluruh isi karya, baik sebagian maupun keseluruhan, bukan merupakan plagiarisme dari karya orang lain, kecuali pada bagian yang telah dinyatakan dan disebutkan sumbernya dengan jelas.

Jika di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap etika akademik atau unsur plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku di Universitas Pendidikan Indonesia.

Bandung, Agustus 2025

Muhammad Syams Nurrohmah

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Perancangan Sistem SmartGlove-CAM: Integrasi Flex-IMU dan Webcam YOLOv8 dengan Validasi Gestur Statis untuk Visualisasi Tangan 3D Real-Time di Unity".

Skripsi ini disusun sebagai salah satu bentuk persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana dari Program Studi S-1 Teknik Elektro Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia. Skripsi ini merupakan hasil perolehan dari berbagai proses pembelajaran, penelitian, dan bimbingan yang tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua yang senantiasa selalu membersamai dalam memberikan motivasi, dukungan, dan doa dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Didin Wahyudin, Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1 Universitas Pendidikan Indonesia yang senantiasa selalu memberikan arahan, masukan, dan motivasi yang besar dalam penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Erik Haritman, S.Pd., M.T. selaku Dosen Pembimbing Pertama yang selalu memberikan arahan, masukan, dan motivasi yang besar dalam penelitian dan penyusunan tugas akhir ini
4. Bapak Dr. Aip Saripudin, S.Si., M.T. selaku Wali Dosen yang selalu memberikan arahan, motivasi, serta dukungan selama proses perkuliahan dan penyusunan dalam tugas akhir ini.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro UPI yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang bermanfaat kepada penulis.

6. Bagaskara Anandayutya, Kevin Kennedy Tampubolon, Fajar Dwi Raditya, dan Yasir Abdul Khalim yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan bantuannya bersama penulis sampai tugas akhir ini selesai.
7. Keluarga mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2021 yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu dalam menemani perjalanan perkuliahan bersama penulis sampai selesainya tugas akhir ini.

Terima kasih atas kebaikan dari berbagai pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang melimpah untuk berbagai pihak yang telah membantu menyelesaikan tugas akhir ini. Dengan menyelesaikan tugas akhir ini, penulis berharap dapat memberikan kontribusi dan manfaat dalam bidang elektro serta dapat menambah wawasan dan inspirasi kepada pembaca.

Bandung, Agustus 2025

Penulis

ABSTRAK

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem *hybrid* SmartGlove-CAM untuk pengenalan gestur tangan statis dan visualisasi pose tangan 3D secara *real-time*. Tujuan penelitian adalah: (1) merancang sistem yang menggabungkan data sarung tangan sensor (sensor flex dan IMU) dengan deteksi YOLOv8 dari kamera eksternal untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan gestur tangan statis; (2) mengimplementasikan prototipe terintegrasi dengan komunikasi *real-time* berbasis UDP antara *glove*, modul deteksi kamera, modul fusi, dan Unity; serta (3) memvisualisasikan gerakan jari dan pergelangan tangan secara *real-time* pada model tangan 3D di Unity. Sistem menggabungkan lima sensor flex dan satu IMU (MPU-9250) per tangan yang dikendalikan ESP32, dengan deteksi visual oleh YOLOv8n. Modul fusi memetakan tangan kiri/kanan, menyaring nilai flex untuk meredam *jitter*, dan memvalidasi label kamera menggunakan klasifier statis (RandomForest) yang dilatih dari dataset lokal. Kebijakan kendali menetapkan: (a) saat tidak ada deteksi kamera, artikulasi jari mengikuti nilai sensor flex *real-time*; (b) saat gestur tangan terdeteksi dan tervalidasi, pose mengikuti label tersebut; dan (c) rotasi pergelangan selalu mengikuti IMU. Evaluasi fungsional pada konfigurasi uji menunjukkan inferensi YOLO $\approx 20\text{--}25$ FPS (320×416), pengiriman *glove* ≈ 50 Hz, dan latensi *end-to-end* $< \approx 150$ ms. Hasil ini mendukung bahwa fusi sensor–visi menjaga kontinuitas pose tangan saat kamera terganggu sekaligus memungkinkan validasi visual untuk gestur statis, sehingga sistem layak untuk aplikasi VR/AR, pelatihan, dan antarmuka *hands-free* berbiaya rendah.

Kata Kunci: *hand gesture recognition, smart glove, YOLOv8, ESP32, IMU, UDP, Unity, real-time.*

ABSTRACT

This research designs and implements a hybrid SmartGlove-CAM system for static hand gesture recognition and real-time 3D hand pose visualization. The objectives of the study are: (1) to design a system that combines data from a sensor glove (flex sensors and an IMU) with YOLOv8-based detection from an external camera to identify and classify static hand gestures; (2) to implement an integrated prototype with real-time UDP communication between the glove, camera detection module, fusion module, and Unity; and (3) to visualize finger and wrist movements in real time on a 3D hand model in Unity. The system integrates five flex sensors and one IMU (MPU-9250) per hand, controlled by an ESP32, with visual detection using YOLOv8n. The fusion module maps left/right hands, filters flex values to reduce jitter, and validates camera labels using a static classifier (RandomForest) trained on a local dataset. The control policy specifies that: (a) when no camera detection is available, finger articulation follows real-time flex sensor data; (b) when a hand gesture is detected and validated, the pose follows the detected label; and (c) wrist rotation is always driven by the IMU. Functional evaluation on the test configuration shows YOLO inference at $\approx 20\text{--}25$ FPS (320×416), glove data transmission at ≈ 50 Hz, and end-to-end latency below ≈ 150 ms. These results demonstrate that the proposed sensor–vision fusion preserves hand pose continuity during camera interruptions while enabling reliable validation of static gestures, making the system suitable for VR/AR applications, training, and low-cost hands-free interfaces.

Keywords: *hand gesture recognition; smart glove; YOLOv8; ESP32; IMU; UDP; RandomForest; Unity; real-time visualization.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Landasan Teori	6
2.1.1 Sensor fleksibel (<i>flex</i>) untuk pelacakan artikulasi jari	6
2.1.2 IMU (MPU-9250) untuk orientasi pergelangan	6
2.1.3 UDP untuk transport data sensor.....	7
2.1.4 Deteksi gestur berbasis YOLOv8.....	7
2.1.5 <i>Dataset</i> , pelabelan, dan kompatibilitas format.....	8
2.1.6 Unity untuk visualisasi tangan <i>virtual</i>	8
2.1.7 Fusi sensor–visi.....	9
2.1.8 Arah desain <i>smart glove</i> modern.....	9
2.2 Kajian Penelitian Terdahulu	9
2.2.1 Pendekatan vision-based	10
2.2.2 <i>Wearable glove</i> dan sensorik	10
2.2.3 Sistem hibrida dan fusi.....	11
2.2.4 Tabel ringkasan perbandingan penelitian terdahulu	12

2.3 Kerangka Pemikiran.....	14
BAB III METODE PENELITIAN	16
3.1 Pendekatan Perancangan.....	16
3.2 Arsitektur Sistem.....	17
3.3 Aliran Data dan Protokol	18
3.3.1 Port dan Format Paket.....	18
3.3.2 Laju dan Waktu	19
3.4 Perangkat Keras	19
3.5 Perangkat Lunak dan Antarmuka.....	20
3.5.1 Sistem Mikrokontrol <i>Glove</i> (ESP32)	20
3.5.2 Deteksi Kamera (Webcam + YOLOv8)	21
3.5.3 Fusi dan Validasi (Python)	21
3.5.4 Unity <i>Receiver</i> dan <i>Rig</i>	21
3.6 Pelatihan Model	22
3.6.1 Pelatihan YOLOv8 (Detektor Gestur Visual)	22
3.6.2 Pelatihan Klasifier Statis (<i>Scikit-learn</i> , <i>RandomForest</i>).....	22
3.7 Kebijakan Fusi dan Transisi	23
3.8 Prosedur Integrasi dan Kalibrasi	23
3.9 Rencana Pengujian	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1 Lingkungan Pengujian dan Skenario	24
4.2 Hasil Pelatihan dan Validasi YOLOv8.....	24
4.3 Kinerja inferensi waktu nyata (webcam → YOLO → UDP)	28
4.4 Aliran data <i>glove</i> dan model statis (flex+IMU → <i>fusion</i>).....	31
4.5 Fusi dan visualisasi di Unity (<i>fusion</i> → UDP JSON → animasi).....	31
4.6 Diskusi kualitas dan batasan yang teramati	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Kesimpulan	34
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA.....	36
LAMPIRAN.....	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian	16
Gambar 3.2 Arsitektur sistem.....	18
Gambar 3.3 Skematik <i>Glove</i> –ESP32	20
Gambar 3.4 Foto Prototipe <i>Glove</i> Kanan.....	20
Gambar 3.5 Foto Prototipe <i>Glove</i> Kiri.....	20
Gambar 3.6 Model Tangan <i>Virtual</i> di Unity	22
Gambar 4.1. Distribusi Label dan Sebaran <i>Bounding Box Dataset</i>	25
Gambar 4.2 Kurva Pelatihan/Validasi YOLOv8 (<i>Loss & Metrik</i>).....	26
Gambar 4.3 <i>Precision–Recall Curve</i>	26
Gambar 4.4 <i>Precision–Confidence Curve</i>	26
Gambar 4.5 <i>Recall–Confidence Curve</i>	27
Gambar 4.6 <i>F1–Confidence Curve</i>	27
Gambar 4.7 <i>Confusion Matrix</i>	27
Gambar 4.8 <i>Confusion Matrix</i> (Ternormalisasi)	28
Gambar 4.9 Contoh Anotasi Batch Validasi.....	28
Gambar 4.10 Deteksi <i>Runtime Right Hand Gloves</i>	29
Gambar 4.11 Deteksi <i>Runtime Left Hand Gloves</i>	30
Gambar 4.12 Konsol YOLO: Kirim Paket UDP Saat Tangan Kanan Terdeteksi .	30
Gambar 4.13 Konsol YOLO: Kirim Paket UDP Saat Tangan Kiri Terdeteksi	30
Gambar 4.14 Konsol <i>Fusion</i> Menerima Data <i>Glove</i> dan Paket <i>Gesture</i>	31
Gambar 4.15 Unity Bergerak Ketika Gestur Terdeteksi dan Juga Terlihat Jendela Deteksi YOLO di Kanan	32
Gambar 4.16 Unity Bergerak Mengikuti Data <i>Real</i> Ketika Gestur Tidak Terdeteksi	32
Gambar 4.17 Pembacaan Gestur YOLO Salah Sehingga Tidak Lolos Validasi Maka Unity Bergerak Mengikuti Data <i>Real</i>	33

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	12
-------------------------------------	----

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Pembimbing.....	38
Lampiran 2. Dxdiag	39
Lampiran 3. Program ESP32 glovesudp.ino	40
Lampiran 4. Program webcam_yolo_udp.py	42
Lampiran 5. Program hand_tracking_fusion.py	44
Lampiran 6. Program Unity HandUDPReceiver.cs	51
Lampiran 7. Dokumentasi Pengujian.....	55
Lampiran 8. Gambar Webcam yang digunakan	56

DAFTAR PUSTAKA

- Chang, M., Xu, H., & Zhang, Y. (2024). Low light recognition of traffic police gestures based on lightweight extraction of skeleton features. *Neurocomputing*, 617, 129042. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.129042>
- Dong, H., Wang, C., Jiang, M., Giorgio-Serchi, F., & Yang, Y. (2025). Modular Soft Wearable Glove for Real-time Gesture Recognition and Dynamic 3D Shape Reconstruction. *arXiv preprint arXiv:2504.05983*. <https://arxiv.org/abs/2504.05983>
- Filipowska, A., Filipowski, W., Raif, P., Pieniążek, M., Bodak, J., Ferst, P., ... & Grzegorzek, M. (2024). Machine Learning-Based Gesture Recognition Glove: Design and Implementation. *Sensors*, 24(18), 6157. <https://doi.org/10.3390/s24186157>
- Kurundkar, S., Malode, S., Patil, H., Girame, M., & Naik, S. (2024). Hand Gesture Recognizer Smart glove using ESP32 and MPU 6050. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 12(4), 217–223. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.64426>
- Leite, C., Byvshev, P., Mauranen, H., & Xiao, Y. (2024). Simulation-driven design of smart gloves for gesture recognition. *Scientific Reports*, 14, 14873. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65069-2>
- Oudah, M., Al-Naji, A., & Chahl, J. (2020). Hand gesture recognition based on computer vision: A review of techniques. *Expert Systems with Applications*, 170, 114–118. <https://doi.org/10.3390/jimaging6080073>
- Tashakori, A., Jiang, Z., Servati, A., Soltanian, S., Narayana, H., Le, K., ... & Servati, P. (2024). Capturing complex hand movements and object interactions using machine learning-powered stretchable smart textile gloves. *arXiv preprint arXiv:2410.02221*. <https://arxiv.org/abs/2410.02221>
- Wei, Z., Zhang, F., Chang, S., Liu, Y., Wu, H., & Feng, Z. (2022). MmWave Radar and Vision Fusion for Object Detection in Autonomous Driving: A Review. *Sensors*, 22(7), 2542. <https://doi.org/10.3390/s22072542>
- Yang, H., Han, M., Li, X., Duan, D., Li, T., & Xu, W. (2024). iRadar: Synthesizing Millimeter-Waves from Wearable Inertial Inputs for Human Gesture Sensing. *arXiv preprint arXiv:2412.15980*. <https://arxiv.org/abs/2412.15980>
- Coquin, D., Lambert, P., & Buzuloiu, V. (2005). Dynamic *hand gesture* recognition using the skeleton of the *hand*. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2005(13), 2101–2109. <https://doi.org/10.1155/ASP.2005.2101>
- Ramakant, S., & Rohit, R. (2015). *Hand gesture* recognition system using 5DT data *glove*. In 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies (IADCC) (pp. 192–196). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IADCC.2015.7154785>
- Arkenbout, E. A., De Winter, J. C. F., & Breedveld, P. (2015). Robust *hand motion tracking* through data *fusion* of 5DT data *glove* and Nimble VR Kinect camera measurements. *Sensors*, 15(12), 29868–29889. <https://doi.org/10.3390/s151229868>

- Elmezain, M., Al-Hamadi, A., & Michaelis, B. (2008). A Hidden Markov Model-based continuous *gesture* recognition system for *hand* motion trajectory. In 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2008) (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2008.4761080>
- Lee, B. G., Chong, T.-W., & Chung, W.-Y. (2020). Sensor *Fusion* of Motion-Based Sign Language Interpretation with Deep Learning. *Sensors*, 20(21), 6256. <https://doi.org/10.3390/s20216256>
- Fei, F., Xian, S., Xie, X., Wu, C., Yang, D., Yin, K., & Zhang, G. (2021). Development of a Wearable *Glove* System with Multiple Sensors for *Hand* Kinematics Assessment. *Micromachines*, 12(4), 362. <https://doi.org/10.3390/mi12040362>
- Nguyen, T.-H., Ngo, B.-V., & Nguyen, T.-N. (2025). Vision-Based *Hand Gesture* Recognition Using a YOLOv8n Model for the Navigation of a Smart Wheelchair. *Electronics*, 14(4), 734. <https://doi.org/10.3390/electronics14040734>
- Ultralytics. (2023). YOLOv8 Documentation. <https://docs.ultralytics.com>
- Roboflow. (2023). Label and Export Custom Dataset for YOLOv8. <https://roboflow.com>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/resources>
- TDK InvenSense. (2018). MPU-9250 Product Specification. <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250>
- Unity Technologies. (2023). Unity Manual Documentation. <https://docs.unity3d.com>
- Postel, J. (1980). User Datagram Protocol. RFC 768. RFC Editor / IETF. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc768>, DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC0768>
- Eggert, L., Fairhurst, G., & Shepherd, G. (2017). UDP Usage Guidelines. RFC 8085 (BCP 145). RFC Editor / IETF. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8085>
- Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., & Jacobson, V. (2003). RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 3550. RFC Editor / IETF. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3550>
- Adobe. (n.d.). *Characters*. Mixamo. Retrieved July 15, 2025, from <https://www.mixamo.com/#/?page=1&type=Character>