

Analisis Akurasi MediaPipe Hand Tracking untuk Deteksi Gerakan Motorik Tangan

Dehana Mutyara^{*1}, Anang Kukuh Adisusilo²

^{1,2} Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Email: ¹dm057@mhs.uwks.ac.id, ²anang65@uwks.ac.id

^{*}Penulis Korespondensi

Abstrak

Teknologi *computer vision* berkembang pesat dan banyak dimanfaatkan pada sistem interaksi berbasis gerakan tangan, seperti *sign language recognition*, pelacakan gerak, dan kontrol tanpa sentuhan. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah MediaPipe Hand Tracking yang mampu mendeteksi titik *landmark* tangan secara *real-time* melalui kamera. Penelitian ini bertujuan menganalisis akurasi MediaPipe Hand Tracking dalam mendeteksi gerakan motorik tangan pada beberapa skenario penggunaan. Metode penelitian dilakukan melalui tahap implementasi sistem deteksi tangan menggunakan MediaPipe, pengolahan *landmark* tangan, serta pengujian terhadap beberapa gerakan dasar seperti membuka tangan, menggenggam, dan gerakan mencubit (*pinch*). Pengujian dilakukan dengan variasi kondisi pencahayaan, jarak tangan terhadap kamera, dan sudut posisi tangan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa deteksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi gerakan tangan secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik pada kondisi pencahayaan dan posisi tangan yang optimal. Berdasarkan hasil pengujian, MediaPipe Hand Tracking memiliki potensi untuk diterapkan pada berbagai aplikasi interaktif berbasis gerakan tangan, termasuk sistem latihan motorik dan rehabilitasi digital.

Kata kunci: computer vision, deteksi gerakan, hand tracking, MediaPipe

Abstract

Computer vision technology has developed rapidly and is widely utilized in gesture-based interaction systems, such as sign language recognition, motion tracking, and touchless control. One of the widely used technologies is MediaPipe Hand Tracking, which is capable of detecting hand landmark points in real-time through a camera. This study aims to analyze the accuracy of MediaPipe Hand Tracking in detecting hand motor movements under several usage scenarios. The research method was conducted through the implementation of a hand detection system using MediaPipe, hand landmark processing, and testing on several basic gestures such as open hand, grasping, and pinch movements. The testing process was carried out under various lighting conditions, hand-to-camera distances, and hand position angles to determine their effects on detection performance. The results showed that the system was able to detect hand movements in real-time with good accuracy under optimal lighting and hand positioning conditions. Based on the testing results, MediaPipe Hand Tracking has the potential to be applied in various hand gesture-based interactive applications, including motor training systems and digital rehabilitation.

Keywords: computer vision, hand tracking, motion detection, MediaPipe

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *computer vision* memungkinkan interaksi antara manusia dan komputer dilakukan secara lebih natural melalui pendeteksian gerakan tubuh, termasuk gerakan tangan. Teknologi ini telah banyak diterapkan pada berbagai bidang seperti *sign language recognition*, sistem kontrol tanpa sentuhan, *virtual interaction*, hingga pelacakan gerak secara *real-time*. Salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem pelacakan tangan adalah MediaPipe Hand Tracking yang dikembangkan oleh Google MediaPipe. Teknologi ini mampu mendeteksi 21 titik *landmark* tangan secara *real-time* hanya menggunakan kamera RGB tanpa memerlukan sensor tambahan.

Kemampuan MediaPipe Hand Tracking dalam melakukan pelacakan tangan secara *real-time* membuka peluang pemanfaatan pada bidang latihan motorik tangan berbasis digital. Sistem deteksi gerakan tangan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan aplikasi interaktif yang memerlukan identifikasi posisi dan pergerakan jari secara akurat. Namun demikian, performa deteksi gerakan tangan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi pencahayaan, jarak tangan terhadap kamera, posisi tangan,

dan kompleksitas gerakan yang dilakukan. Permasalahan tersebut menyebabkan akurasi sistem menjadi penting untuk dianalisis sebelum teknologi diterapkan pada kebutuhan yang lebih spesifik.

Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan MediaPipe pada sistem pengenalan *gesture* tangan, pengendalian antarmuka, dan penerjemahan bahasa isyarat. Sebagian besar penelitian berfokus pada implementasi fungsi deteksi *gesture*, sedangkan analisis performa dan akurasi deteksi pada skenario gerakan motorik tangan masih relatif terbatas. Selain itu, beberapa penelitian hanya menguji sistem pada kondisi lingkungan yang terkontrol sehingga belum memberikan gambaran performa sistem pada variasi kondisi penggunaan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis akurasi MediaPipe Hand Tracking dalam mendeteksi gerakan motorik tangan pada beberapa kondisi pengujian. Penelitian dilakukan dengan mengimplementasikan sistem deteksi tangan berbasis *computer vision*, kemudian menguji kemampuan sistem dalam mengenali beberapa gerakan dasar tangan seperti membuka tangan, *fist* atau menggenggam, dan gerakan *pinch*. Pengujian dilakukan dengan variasi pencahayaan, jarak, dan sudut tangan terhadap kamera untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa deteksi.

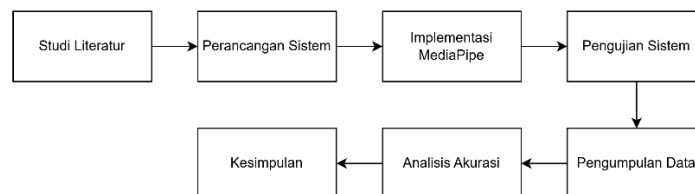
Metode penelitian yang digunakan terdiri dari tahap studi literatur, perancangan sistem deteksi tangan, implementasi menggunakan MediaPipe Hand Tracking, pengujian sistem, serta analisis hasil deteksi berdasarkan skenario pengujian yang telah ditentukan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat akurasi dan kelayakan penggunaan MediaPipe Hand Tracking sebagai teknologi pendeteksi gerakan tangan pada aplikasi interaktif berbasis gerakan motorik.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis akurasi MediaPipe Hand Tracking dalam mendeteksi gerakan motorik tangan menggunakan pendekatan *computer vision*. Metodologi penelitian terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu studi literatur, perancangan sistem, implementasi deteksi tangan, pengujian sistem, pengumpulan data, dan analisis hasil pengujian.

Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada alur penelitian berikut.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan mulai dari studi literatur hingga analisis hasil pengujian sistem. Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep *computer vision*, hand tracking, dan implementasi MediaPipe. Setelah itu dilakukan identifikasi gerakan tangan yang akan diuji, dilanjutkan dengan perancangan dan implementasi sistem deteksi tangan berbasis kamera. Sistem kemudian diuji pada beberapa kondisi untuk memperoleh data akurasi deteksi yang selanjutnya dianalisis sebagai dasar penarikan kesimpulan.

2.2. Studi Literatur

2.2.1. Computer Vision

Teknologi Hand Tracking berbasis *Computer Vision* memungkinkan proses pelacakan gerakan tangan secara langsung tanpa memerlukan perangkat *wearable*. Sistem ini memanfaatkan kamera untuk mengenali posisi, orientasi, serta landmark jari melalui algoritma pengolahan citra. Metode yang digunakan menggabungkan *deep learning* seperti Convolutional Neural Network (CNN) untuk mengekstraksi fitur spasial, Long Short-Term Memory (LSTM) untuk memproses dinamika temporal, serta mekanisme *attention* guna meningkatkan ketepatan deteksi pada latar yang kompleks maupun gerakan cepat. Tantangan utama dalam penerapannya mencakup variasi pencahayaan, oklusi, dan tingginya kebutuhan komputasi, yang kemudian diatasi menggunakan model *hybrid* sehingga mampu mencapai tingkat akurasi hingga 95% dalam pengenalan *gesture* dinamis [1].

Penerapan *hand tracking* berbasis *computer vision* diawali dengan proses segmentasi tangan menggunakan *skin color* seperti YCbCr atau HSV, motion detection, maupun depth data dari kamera seperti Kinect. Tahap berikutnya adalah pendeteksian landmark berupa 21 titik 3D pada setiap tangan. CNN banyak digunakan dalam ekstraksi fitur untuk mengurangi masalah *edge blurring* dan kesalahan rotasi, sedangkan LSTM berperan dalam menangkap hubungan temporal pada rangkaian *frame video*.

2.2.2. MediaPipe Hand

Google mengembangkan MediaPipe Hands sebagai teknologi *hand tracking* berbasis *computer vision* yang mampu mendeteksi serta melacak gerakan tangan secara real-time melalui kamera. Teknologi ini dirancang untuk mengenali posisi tangan sekaligus memetakan titik-titik penting (*landmarks*) pada tangan manusia tanpa membutuhkan perangkat sensor tambahan [28]. Dengan menjadikan kamera sebagai sumber *input* utama, MediaPipe Hands mendukung interaksi tanpa sentuhan (*touchless*) yang lebih fleksibel pada berbagai kondisi penggunaan [2].

2.2.3. Deteksi Gesture Tangan

Deteksi gesture tangan merupakan teknologi berbasis pengolahan citra dan *computer vision* yang digunakan untuk mengenali gerakan tangan sebagai media interaksi manusia dengan komputer maupun alat komunikasi bagi penyandang tuna rungu dan tuna wicara [3]. Sistem ini memanfaatkan kamera untuk menangkap gerakan tangan, kemudian diproses menggunakan metode seperti YOLO-v3, OpenCV, dan MediaPipe agar mampu mendeteksi serta mengklasifikasikan posisi dan bentuk tangan secara *real-time* [4].

Teknologi tersebut dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode sebelumnya yang sangat dipengaruhi oleh pencahayaan dan latar belakang objek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali berbagai *gesture* tangan dengan tingkat akurasi tinggi, bahkan pada kondisi jarak, intensitas cahaya, dan *background* yang berbeda-beda, sehingga dapat diterapkan pada berbagai kebutuhan seperti bahasa isyarat, pengendalian kursor presentasi, hingga interaksi tanpa sentuhan [3][4].

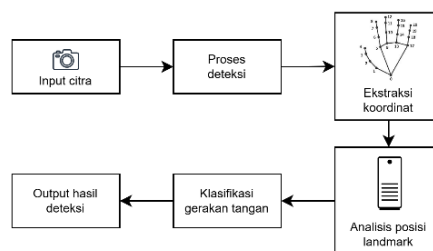
2.2.1. Metode Evaluasi Akurasi Sistem Deteksi

Evaluasi akurasi merupakan salah satu tahap penting dalam pengembangan sistem deteksi berbasis *computer vision*. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kemampuan sistem dalam mengenali objek atau *gesture* secara benar berdasarkan data pengujian yang telah dilakukan. Pada penelitian sistem deteksi *gesture* tangan, pengukuran akurasi digunakan untuk menilai performa MediaPipe Hand Tracking dalam mengenali gerakan motorik tangan pada berbagai kondisi pengujian.

Metode evaluasi dilakukan dengan membandingkan jumlah hasil deteksi yang sesuai terhadap total seluruh pengujian. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi kondisi, seperti perbedaan pencahayaan, jarak tangan terhadap kamera, serta sudut posisi tangan. Variasi kondisi tersebut digunakan untuk mengetahui stabilitas dan konsistensi sistem dalam melakukan deteksi secara *real-time*.

2.3. Perancangan Sistem

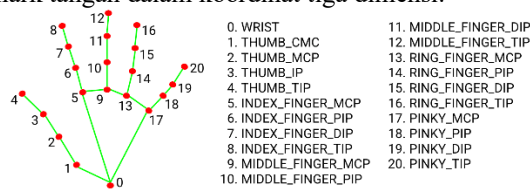
Sistem yang dikembangkan merupakan sistem deteksi gerakan tangan berbasis kamera menggunakan MediaPipe Hand Tracking. Sistem bekerja dengan mengambil citra video secara real-time melalui *webcam*, kemudian mendeteksi posisi tangan dan landmark jari untuk mengidentifikasi gerakan tertentu.



Gambar 2. Alur Sistem Deteksi Gerakan Tangan

Gambar 2 menunjukkan alur kerja sistem deteksi tangan. Kamera digunakan untuk mengambil citra video secara real-time. Setiap frame diproses menggunakan MediaPipe Hand Tracking untuk mendeteksi landmark tangan. Landmark yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan jenis gerakan tangan berdasarkan posisi dan hubungan antar titik landmark.

MediaPipe Hand Tracking menggunakan model machine learning untuk mendeteksi tangan dan menghasilkan 21 titik landmark tangan dalam koordinat tiga dimensi.



Gambar 3. Titik kunci dari 21 koordinat hand landmarks pada MediaPipe Hands

Gambar 3 menunjukkan struktur landmark tangan pada MediaPipe Hand Tracking. Setiap titik landmark merepresentasikan posisi tertentu pada tangan dan digunakan sebagai dasar analisis gerakan. Data koordinat landmark digunakan untuk menghitung jarak, sudut, dan kondisi buka-tutup jari.

2.4. Implementasi MediaPipe

Penelitian ini menggunakan beberapa gerakan dasar motorik tangan antara lain, Open Palm, Fist, dan Pinch.

Gerakan open palm dideteksi berdasarkan berdasarkan posisi ujung jari terhadap sendi Tengah tangan. Secara matematis kondisi open palm ditunjukkan pada pertidaksamaan [1].

$$y_{tip} < y_{pip} \quad [1]$$

dengan:

y_{tip} = koordinat ujung jari,

y_{pip} = koordinat sendi tengah jari.

Jika seluruh kondisi jari memenuhi pertidaksamaan tersebut, maka sistem mengklasifikasikan gerakan sebagai open palm. Gerakan menggenggam (fist) dideteksi ketika seluruh ujung jari berada di bawah sendi jari, memenuhi kondisi pada pertidaksamaan [2].

$$y_{tip} > y_{pip} \quad [2]$$

Jika mayoritas jari memenuhi kondisi tersebut, maka sistem mendeteksi gerakan sebagai fist. Sedangkan gerakan pinch dideteksi berdasarkan jarak antara landmark ibu jari dan telunjuk seperti ditunjukkan oleh persamaan [3].

Persamaan Euclidean Distance:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad [3]$$

Keterangan:

d = jarak antar landmark,

(x_1, y_1) = koordinat ibu jari,

(x_2, y_2) = koordinat telunjuk.

Jika nilai jarak berada di bawah ambang batas (treshold), maka sistem mengidentifikasi gesture sebagai pinch.

2.5. Algoritma Sistem

Proses utama sistem dapat dijelaskan menggunakan pseudocode pada Tabel 1.

Tabel 1. Pseudocode alur kerja sistem

```

Start
Initialize camera
Initialize MediaPipe

While camera active:
    Capture frame
    Detect hand landmarks

    If hand detected:
        Extract landmark coordinates

        If all fingers open:
            Gesture = Open Palm
    
```

```

Else if all fingers closed:
    Gesture = Fist

Else if thumb-index distance < threshold:
    Gesture = Pinch

Display detection result

End

```

Tabel 1 menunjukkan algoritma utama sistem deteksi gerakan tangan. Sistem berjalan secara real-time dengan mengambil frame video dari kamera, mendeteksi landmark tangan menggunakan MediaPipe, kemudian melakukan klasifikasi gesture berdasarkan kondisi posisi landmark tangan.

2.6. Pengumpulan Data

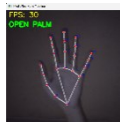
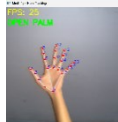
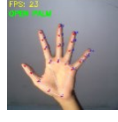
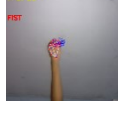
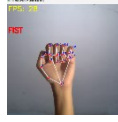
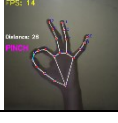
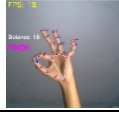
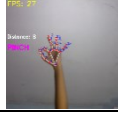
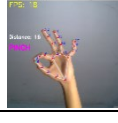
Data penelitian diperoleh melalui pengujian langsung menggunakan webcam laptop. Parameter pengujian meliputi dengan skenario percobaan pada Tabel 2.

2.6.1. Variasi Pencahayaan

2.6.2. Variasi Jarak

2.6.3. Variasi Sudut Tangan

Tabel 2. Parameter Pengujian

Gesture	Terang	Redup	Gelap	30 cm	50 cm	Frontal	45°
Open Palm							
Fist							
Pinch							

2.7. Teknik Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghitung Tingkat keberhasilan deteksi gesture dengan rumus akurasi pada persamaan [4].

$$Accuracy = \frac{Jumlah\ Deteksi\ Benar}{Jumlah\ Total\ Pengujian} \times 100\% \quad [4]$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian 3 membahas hasil implementasi dan pengujian sistem deteksi gerakan motorik tangan berbasis *computer vision* menggunakan MediaPipe. Pengujian dilakukan untuk menganalisis tingkat akurasi sistem dalam mendeteksi *gesture* tangan secara *real-time* pada berbagai kondisi pencahayaan, jarak, dan sudut tangan. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui performa, kestabilan, serta faktor-faktor yang mempengaruhi proses deteksi *gesture* tangan.

3.1. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem dalam mendeteksi gesture tangan pada berbagai kondisi pencahayaan, jarak, dan sudut tangan. Terdapat tiga gesture yang diuji, yaitu Open Palm, Fist, dan Pinch.

3.1.1 Hasil Pengujian Gesture Open Palm

Tabel 3. Hasil Pengujian Gesture Open Palm

Gesture	Cahaya	Jarak	Sudut	Total	Benar	Salah
Open Palm	Terang	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
	Redup	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
	Gelap	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
Total				240	240	0

Berdasarkan Tabel 2, gesture Open Palm memperoleh tingkat akurasi sebesar 100%. Sistem mampu mendeteksi gesture secara konsisten pada seluruh kondisi pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa gesture dengan karakteristik jari terbuka memiliki landmark yang mudah dikenali oleh sistem MediaPipe Hand Tracking.

3.1.2 Hasil Pengujian Gesture Fist

Tabel 4. Hasil Pengujian Gesture Fist

Gesture	Cahaya	Jarak	Sudut	Total	Benar	Salah
Fist	Terang	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
	Redup	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
	Gelap	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	14	6
			45°	20	11	9
Total				240	225	15

Perhitungan akurasi gesture Fist dilakukan menggunakan persamaan akurasi dengan membandingkan jumlah deteksi benar terhadap total pengujian yang dilakukan.

$$Accuracy = \frac{225}{240} \times 100\% = 93,75\% \quad [5]$$

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, gesture Fist memperoleh tingkat akurasi sebesar 93.75%. Kesalahan deteksi terjadi pada kondisi pencahayaan gelap dengan jarak 50 cm, baik pada posisi frontal maupun sudut miring 45°. Kondisi pencahayaan rendah menyebabkan landmark jari kurang stabil sehingga beberapa jari tidak terdeteksi secara optimal.

3.1.3 Hasil Pengujian Gesture Pinch

Tabel 5. Pengujian Gesture Pinch

Gesture	Cahaya	Jarak	Sudut	Total	Benar	Salah
Pinch	Terang	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
	Redup	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	20	0
		50 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	19	1
	Gelap	30 cm	Frontal	20	20	0
			45°	20	16	4
		50 cm	Frontal	20	11	9
			45°	20	5	15
Total				240	211	29

Perhitungan akurasi gesture Pinch juga dilakukan menggunakan persamaan akurasi dengan membandingkan jumlah deteksi benar terhadap total pengujian yang dilakukan.

$$Accuracy = \frac{211}{240} \times 100\% = 87,92\% \quad [5]$$

Gesture Pinch pada data yang ditunjukkan oleh Tabel 4 memperoleh tingkat akurasi sebesar 87.92%, yang merupakan nilai akurasi terendah dibanding gesture lainnya. Hal ini disebabkan gesture Pinch menggunakan pendekatan perhitungan jarak antar landmark yang lebih sensitif terhadap perubahan posisi tangan, pencahayaan, dan sudut kemiringan tangan.

Kesalahan deteksi paling banyak terjadi pada kondisi pencahayaan gelap dengan jarak 50 cm dan sudut 45°. Pada kondisi tersebut, sistem mengalami kesulitan dalam mempertahankan stabilitas landmark ujung jari sehingga perhitungan jarak menjadi kurang akurat.

3.2. Analisis Performa Sistem

Berdasarkan Gambar 4.5, gesture Open Palm memiliki tingkat akurasi tertinggi dibanding gesture lainnya. Hal ini disebabkan struktur landmark pada gesture tangan terbuka lebih mudah dikenali oleh sistem. Gesture Pinch memiliki tingkat akurasi terendah karena menggunakan pendekatan berbasis jarak antar landmark yang lebih sensitif terhadap perubahan kecil posisi tangan dan kondisi lingkungan.

3.3. Pengaruh Pencahayaan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pencahayaan menjadi faktor yang paling mempengaruhi performa sistem. Pada kondisi pencahayaan gelap, sistem mengalami penurunan stabilitas deteksi landmark sehingga beberapa gesture tidak dapat dikenali dengan baik. Landmark tangan membutuhkan kontras visual yang cukup agar model MediaPipe mampu melakukan estimasi posisi titik tangan secara optimal.

3.4. Pengaruh Jarak dan Sudut

Selain pencahayaan, jarak dan sudut tangan juga mempengaruhi akurasi sistem. Pada jarak 50 cm dan sudut miring 45°, ukuran tangan yang tertangkap kamera menjadi lebih kecil dan beberapa landmark mengalami overlap. Kondisi tersebut menyebabkan sistem kesulitan mempertahankan konsistensi posisi landmark secara real-time.

3.5. Potensi Implementasi

Berdasarkan hasil pengujian, sistem MediaPipe Hand Tracking memiliki performa yang cukup baik dalam mendeteksi gesture motorik tangan secara real-time. Sistem mampu bekerja tanpa menggunakan sensor tambahan dan hanya memanfaatkan webcam sebagai perangkat input.

Dengan tingkat akurasi yang diperoleh, teknologi ini memiliki potensi untuk diterapkan pada berbagai sistem interaktif berbasis gerakan tangan, seperti gesture control, virtual interaction, serious game, maupun sistem latihan motorik tangan digital.

Selain itu, teknologi ini juga berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai media pendukung rehabilitasi motorik tangan pada pasien pasca stroke maupun terapi gerakan tangan interaktif lainnya.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem deteksi gerakan motorik tangan berbasis computer vision menggunakan MediaPipe berhasil diimplementasikan dan mampu mendeteksi gesture tangan secara real-time menggunakan webcam. Sistem berhasil mengenali tiga gesture utama, yaitu Open Palm, Fist, dan Pinch berdasarkan posisi dan jarak antar landmark tangan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa gesture Open Palm memperoleh akurasi tertinggi sebesar 100%, diikuti gesture Fist sebesar 93.75%, dan gesture Pinch sebesar 87.92%. Penurunan akurasi terjadi pada kondisi pencahayaan gelap, jarak 50 cm, dan sudut tangan miring 45°, yang mempengaruhi kestabilan deteksi landmark tangan.

Secara keseluruhan, MediaPipe Hand Tracking memiliki performa yang cukup baik untuk mendeteksi gerakan motorik tangan tanpa menggunakan sensor tambahan. Teknologi ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut pada aplikasi interaktif berbasis gesture, seperti serious game, gesture control, dan sistem latihan motorik tangan digital.

REFERENSI

- [1] C. Cui, M. S. Sunar, and G. Eg Su, "Deep vision-based real-time hand gesture recognition: a review," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 11, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.2921.
- [2] N. H. M. DHUZUKI *et al.*, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DEEP LEARNING BASED HAND GESTURE RECOGNITION SYSTEM FOR REHABILITATION INTERNET-OF-THINGS (RIOT) ENVIRONMENTS USING MEDIAPIPE," *IJUM Engineering Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 353–372, 2025, doi: 10.31436/IJUM EJ.V26I1.3455.
- [3] A. Sani and S. Rahmadinni, "Deteksi Gestur Tangan Berbasis Pengolahan Citra," *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, vol. 18, no. 2, Jul. 2022, doi: 10.17529/jre.v18i2.25147.
- [4] L. Fitriani and I. Nurhakim, "Sistem Deteksi Gerakan Tangan Untuk Pengendalian Kursor Pada Presentasi Berbasis Opencv dan Mediapipe," *Jurnal Algoritma*, vol. 22, no. 2, Nov. 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-2.2485.