

Comparative Analysis of ArUco Marker Detection Techniques Using Adaptive Thresholding, CLAHE, and Kalman Filter for Smart Cane Applications

Koko Edy Yulianto^{*1}, Rujianto Eko Saputro², Fandy Setyo Utomo³

¹Information System, Computer Science Faculty, Universitas Amikom Purwokerto, Indonesia

^{2,3}Magister of Computer Science, Computer Science Faculty, Universitas Amikom Purwokerto, Indonesia

Email: ¹medikaputrawijayakusuma@gmail.com

Received : Jun 15, 2025; Revised : Jun 30, 2025; Accepted : Jun 30, 2025; Published : Aug 18, 2025

Abstract

This study aims to analyze and compare the effectiveness of three image processing techniques Adaptive Thresholding, CLAHE, and Kalman Filter in enhancing the performance of ArUco marker detection for a smart cane system designed for visually impaired individuals at SLB Kuncup Mas Banyumas. The evaluation method includes detection accuracy, marker position precision, and computational time required by each technique under two different lighting conditions: daytime and nighttime. The results show that all three image processing techniques successfully achieved a 100% detection accuracy for ArUco markers. However, significant differences were observed in computational time, with Kalman Filter demonstrating the fastest processing speed, making it the most efficient option for real-time applications requiring quick response. CLAHE and Adaptive Thresholding performed better in uneven lighting conditions, although they required longer computational times. Kalman Filter is therefore recommended for marker-based navigation systems in environments demanding fast response times, while CLAHE and Adaptive Thresholding are better suited for settings with variable lighting intensities. The implications of these findings open opportunities for developing adaptive navigation systems capable of dynamically adjusting image preprocessing methods based on real-time environmental conditions. This study contributes practically to the advancement of assistive navigation technologies for visually impaired individuals, particularly in the development of visual marker-based detection systems. The results also provide a useful guideline for selecting appropriate image processing techniques according to environmental characteristics, thereby improving the accuracy and adaptability of navigation systems across diverse lighting conditions and operational environments.

Keywords: Adaptive Thresholding, ArUco Marker, Blind and Visually Impaired, CLAHE, Kalman Filter, Smart Cane System

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Pendidikan bagi siswa tunanetra di SLB masih menghadapi tantangan dalam mewujudkan lingkungan belajar yang aman, inklusif, dan mendukung kemandirian. Keterbatasan mobilitas serta orientasi ruang sering menjadi hambatan dalam aktivitas sehari-hari siswa. Pemanfaatan teknologi asistif seperti sistem tongkat pintar sangat dibutuhkan guna membantu navigasi, meningkatkan kemandirian, dan menunjang kualitas hidup siswa tunanetra [1].

Tongkat pintar dapat dilengkapi dengan berbagai sensor yang memungkinkan penggunaannya mendeteksi objek atau hambatan di lingkungan sekitar. Salah satu komponen utama yang meningkatkan fungsionalitas tongkat pintar adalah penggunaan marker visual, seperti marker ArUco [2]. Marker ArUco adalah marker fiducial dua dimensi yang sering digunakan dalam aplikasi pengolahan citra untuk

deteksi posisi dan orientasi objek di dunia nyata [3]. Pada tongkat pintar, marker ArUco dapat digunakan untuk menandai lokasi-lokasi tertentu di sekitar pengguna, memberikan informasi penting tentang arah dan keberadaan rintangan. Sistem ini berfungsi dengan mengidentifikasi posisi marker ArUco yang diletakkan di sekitar area tertentu, lalu memberikan informasi navigasi melalui umpan balik kepada pengguna[4].

Pentingnya deteksi marker ArUco yang akurat dalam sistem tongkat pintar menuntut penggunaan teknik pemrosesan citra yang handal. Beberapa teknik yang banyak digunakan dalam mendeteksi marker ArUco adalah adaptive thresholding, CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*), dan Kalman filter. Adaptive thresholding digunakan untuk mengatasi masalah pencahayaan yang tidak merata dalam citra[5]. Teknik ini menyesuaikan ambang batas deteksi berdasarkan area lokal pada citra, yang sangat berguna dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi di lapangan [6]. Adaptive thresholding menyesuaikan ambang batas deteksi secara adaptif berdasarkan kondisi lokal citra, sehingga meningkatkan kualitas deteksi objek dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi [7]. Penggunaan adaptive thresholding dapat memperbaiki akurasi deteksi dalam kondisi yang kurang terang atau dengan kontras rendah, yang sering dijumpai dalam aplikasi dunia nyata [8][9].

CLAHE diterapkan untuk meningkatkan kontras citra secara adaptif, sehingga mempermudah deteksi marker ArUco pada citra dengan pencahayaan rendah [10]. Teknik ini membatasi amplifikasi kontras untuk mencegah noise berlebihan, yang sangat penting dalam meningkatkan visibilitas marker pada kondisi pencahayaan yang kurang ideal [11]. CLAHE memungkinkan sistem tongkat pintar mengenali marker ArUco secara lebih akurat, bahkan dalam lingkungan dengan pencahayaan terbatas [12].

Salah satu tantangan dalam deteksi marker ArUco adalah mempertahankan akurasi meskipun terjadi perubahan posisi atau gangguan noise di sekitar marker [13]. Kalman filter memainkan peran kunci dalam memperbaiki estimasi posisi dan orientasi marker dengan mengurangi dampak *noise* pada data yang diterima, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih stabil dan akurat. Penggunaan Kalman filter dalam deteksi marker terbukti efektif dalam mengatasi ketidakakuratan yang disebabkan oleh pergerakan sistem atau gangguan sinyal [14]–[16]. Kalman filter juga tahan terhadap gangguan dan ketidakpastian, menjadikannya sangat relevan untuk aplikasi yang memerlukan estimasi posisi yang stabil, seperti dalam sistem tongkat pintar [17]. Unscented Kalman Filter (UKF) yang digabungkan dengan Feature Triangle memberikan metode pelacakan posisi yang lebih akurat dan pendekatan ini juga dapat diterapkan secara efektif dalam pelacakan marker ArUco. [18]. Pelacakan real-time pada sayap aeroelastik menunjukkan potensi adaptasi Kalman filter dalam menghadapi variabilitas dan perubahan kondisi lingkungan[19]. Penerapan Gauss Hermite Kalman Filter dalam pelacakan sinyal GPS, memperlihatkan bagaimana Kalman filter dapat mengatasi gangguan dalam deteksi marker ArUco [20]. Kalman filter mampu dalam memperbaiki deteksi marker dalam situasi dinamis seperti pelacakan mata [21]. Pada path tracking mampu meningkatkan kinerja sistem deteksi marker ArUco pada tongkat pintar dengan mengatasi gangguan visual dan gerakan dinamis[22].

Penerapan sistem tongkat pintar berbasis deteksi marker ArUco di Sekolah Luar Biasa (SLB) Kuncup Mas Banyumas sangat relevan, mengingat tingginya kebutuhan siswa tunanetra akan alat bantu navigasi yang aman dan efektif. Keterbatasan mobilitas yang dimiliki siswa dengan gangguan penglihatan kerap menjadi hambatan dalam berinteraksi dengan lingkungan sekitar. Kehadiran teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan kemandirian mereka, sekaligus memperluas akses terhadap aktivitas pendidikan dan sosial di lingkungan sekolah. Dengan dukungan sistem tongkat pintar, siswa tunanetra dapat bergerak lebih aman, efisien, dan tidak lagi bergantung sepenuhnya pada pendamping dalam menjalani aktivitas sehari-hari

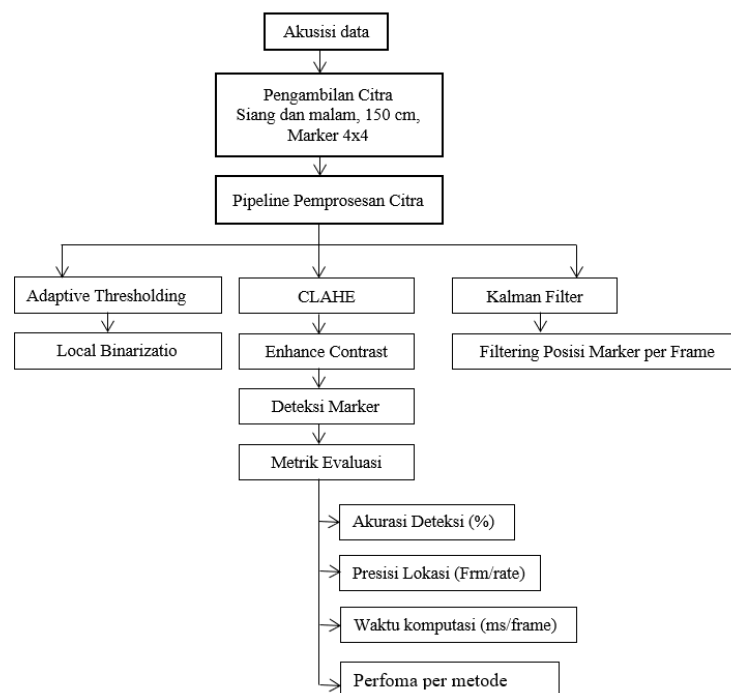
Deteksi ambang adaptif dalam mendeteksi potensial citra dapat menyesuaikan ambang batas deteksi sesuai dengan variasi sinyal yang diterima dalam meningkatkan akurasi dalam kondisi yang

dinamis [23]. Meskipun teknologi deteksi marker ArUco telah banyak diterapkan dalam berbagai sistem, terutama pada aplikasi berbasis robotika [24], [25], Belum banyak penelitian yang membandingkan efektivitas teknik pemrosesan citra seperti adaptive thresholding, CLAHE, dan Kalman filter dalam konteks tongkat pintar untuk penyandang disabilitas visual. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif antara ketiga teknik tersebut, untuk mengevaluasi mana yang paling efektif dalam meningkatkan akurasi dan kinerja sistem tongkat pintar di lingkungan SLB Kuncup Mas Banyumas. Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi assistive yang lebih efisien dan efektif bagi penyandang tunanetra.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen komparatif, yang bertujuan untuk membandingkan efektivitas teknik pemrosesan citra dalam mendeteksi marker ArUco pada sistem tongkat pintar bagi penyandang tunanetra di Sekolah Luar Biasa (SLB) Kuncup Mas Banyumas. Tiga teknik utama, yaitu adaptive thresholding, CLAHE, dan Kalman filter.



Gambar 1. Diagram Alur Sistem Deteksi Marker ArUco untuk Tongkat Pintar

2.2. Adaptive Thresholding

Teknik pengujian untuk menilai kemampuannya dalam mengatasi masalah pencahayaan yang tidak merata pada citra. Penyesuaian ambang batas secara lokal di setiap area citra diharapkan dapat meningkatkan kualitas deteksi marker[7].

1. Parameter kunci

Konfigurasi: Ambang adaptif lokal berdasarkan area piksel

Kondisi: Siang dan malam hari

a. Hasil:

Akurasi Deteksi: 100% di seluruh kondisi

Presisi Lokasi Marker: Stabil di angka 66

b. Waktu Komputasi:

Siang hari: 44,92 ms – 45,33 ms per frame

Malam hari: 44,58 ms – 45,87 ms per frame

2. Evaluasi

Adaptive Thresholding menunjukkan akurasi dan presisi yang optimal dengan waktu komputasi paling tinggi. Kelebihannya terletak pada kemampuannya mempertahankan akurasi dalam kondisi pencahayaan tidak merata, kurang ideal untuk aplikasi yang memerlukan waktu respons cepat.

2.3. CLAHE

Teknik untuk meningkatkan kontras citra dengan membatasi amplifikasi histogram. Mengevaluasi bagaimana CLAHE dapat meningkatkan deteksi marker dalam kondisi pencahayaan yang buruk[26].

1. Parameter kunci

Konfigurasi: Kontras histogram lokal

Kondisi: Siang dan malam hari

a. Hasil:

Akurasi Deteksi: 100% di seluruh kondisi

Presisi Lokasi Marker: Tetap stabil di angka 66

b. Waktu Komputasi:

Siang hari: 31,51 ms – 33,99 ms per frame

Malam hari: 31,71 ms – 34,38 ms per frame

2. Evaluasi

a. Akurasi Deteksi Marker: efektif dalam meningkatkan kemampuan sistem untuk mendeteksi marker ArUco dalam citra dengan pencahayaan yang buruk. Deteksi yang akurat menandakan bahwa CLAHE efektif dalam memperbaiki kontras marker yang terlihat kabur atau gelap pada kondisi pencahayaan rendah.

b. Waktu Pemrosesan: Waktu komputasi relatif cepat dan stabil.

c. Peningkatan Kontras: Kemampuannya menangani pencahayaan tidak merata menjadi keunggulan utama.

2.4. Kalman Filter

Teknik untuk mengurangi noise dan memperbaiki estimasi posisi marker ArUco yang terdeteksi. Kalman filter dapat meningkatkan akurasi estimasi posisi marker meskipun terjadi gangguan atau pergerakan sistem[27].

1. Parameter kunci

Konfigurasi: Prediksi posisi marker antar frame

Kondisi: Siang dan malam hari

a. Hasil:

Akurasi Deteksi: 100% di seluruh kondisi

Presisi Lokasi Marker: Stabil di angka 66

b. Waktu Komputasi:

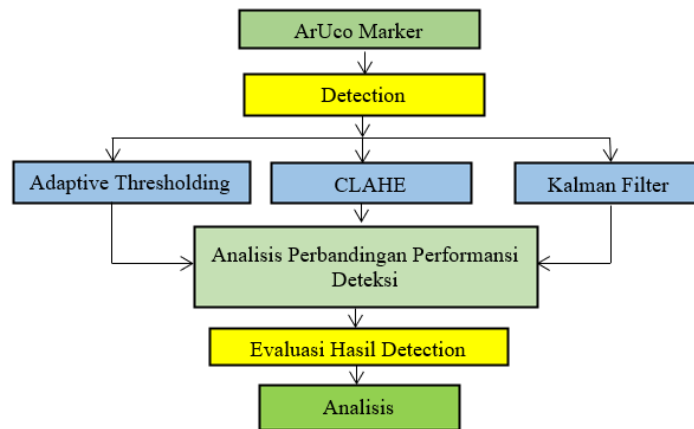
Siang hari: 30,62 ms – 32,01 ms per frame

Malam hari: 29,58 ms – 31,75 ms per frame

2. Evaluasi:

Kalman Filter mencatat waktu komputasi paling cepat di antara ketiga teknik, dengan performa yang sangat stabil pada berbagai kondisi pencahayaan. Teknik ini sangat sesuai untuk aplikasi real-time yang membutuhkan respons cepat tanpa mengorbankan akurasi dan presisi deteksi

2.5. Diagram Penelitian



Gambar 2. Diagram penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Tampilan Data

Pada penelitian ini ruang lingkup penelitian dilakukan pada siang hari dan malam hari. Berikut hasil penelitian yang dilakukan di lingkungan siang hari dan di luar ruangan dengan jarak 150 cm dan menggunakan marker berukuran 4x4 didapati hasil sebagai berikut:

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 bahwa hasil uji menunjukkan kinerja yang stabil pada ketiga teknik deteksi marker ArUco. Ketiga teknik yang diuji, yaitu CLAHE, Kalman Filter, dan Adaptive Thresholding, masing-masing mempertahankan akurasi deteksi sebesar 100%, menunjukkan bahwa ketiga teknik ini mampu mendeteksi marker ArUco dengan sangat baik meskipun dalam kondisi pencahayaan yang cukup terang. Penerapan CLAHE didapati waktu komputasi berkisar antara 31,51 ms hingga 33,99 ms per frame, yang menunjukkan waktu pemrosesan relatif stabil dan cepat. Presisi lokasi marker juga tetap pada nilai 66, mengindikasikan bahwa posisi marker dapat ditentukan dengan baik pada setiap percobaan. Pada Kalman Filter, waktu komputasi yang tercatat berkisar antara 32,01 ms hingga 30,62 ms per frame. Ini menunjukkan bahwa Kalman Filter sedikit lebih cepat dibandingkan dengan CLAHE, namun memiliki waktu komputasi yang tetap konsisten dan tidak terlalu jauh perbedaannya. Presisi lokasi marker juga tetap pada angka 66, menunjukkan ketepatan dalam mendeteksi posisi marker. Adaptive Thresholding menunjukkan waktu komputasi sedikit lebih tinggi, dengan rentang 44,92 ms hingga 45,33 ms per frame. Meski memerlukan waktu yang lebih lama, teknik ini tetap mempertahankan akurasi deteksi 100% dan presisi lokasi marker pada angka 66. Ini menunjukkan bahwa meskipun membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih lama, teknik ini mampu memberikan hasil yang sangat baik dalam hal akurasi.

Berikut hasil penelitian yang dilakukan di lingkungan malam hari dan didalam ruangan dengan jarak 150 cm dan menggunakan marker berukuran 4x4 didapati hasil pada Table 1.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 bahwa hasil Pada percobaan yang dilakukan di lingkungan malam hari, di dalam ruangan dengan jarak 150 cm dan menggunakan marker berukuran 4x4, hasil uji menunjukkan performa yang sangat baik dari ketiga teknik deteksi marker ArUco yang diuji. Ketiga teknik CLAHE, Kalman Filter, dan Adaptive Thresholding menunjukkan akurasi deteksi 100%, yang mengindikasikan bahwa ketiga teknik ini mampu mendeteksi marker ArUco dengan sempurna meskipun dalam kondisi pencahayaan yang lebih rendah. Penerapan CLAHE diperoleh waktu komputasi yang tercatat berkisar antara 31,71 ms hingga 34,38 ms per frame. Hasil ini menunjukkan

bahwa meskipun dalam kondisi malam hari, CLAHE masih mampu memberikan waktu pemrosesan yang relatif cepat dan konsisten. Presisi lokasi marker tetap pada angka 66, yang berarti marker dapat dikenali dan diposisikan dengan akurat. Pada Kalman Filter diperoleh waktu komputasi berkisar antara 29,58 ms hingga 31,75 ms per frame. Kalman Filter menunjukkan kinerja yang sedikit lebih cepat dibandingkan dengan CLAHE, dengan waktu komputasi yang lebih stabil dan lebih rendah, yang memberikan keuntungan dalam aplikasi sistem yang membutuhkan respon cepat. Seperti CLAHE, presisi lokasi marker tetap pada angka 66, menunjukkan ketepatan dalam penentuan posisi marker. Adaptive Thresholding menunjukkan waktu komputasi yang lebih tinggi, berkisar antara 44,58 ms hingga 45,87 ms per frame. Meskipun membutuhkan waktu komputasi lebih lama, teknik ini tetap memberikan hasil yang sangat baik dengan akurasi deteksi 100% dan presisi lokasi marker yang stabil pada angka 66.

Tabel 1. Hasil Uji Lingkungan Siang Hari, diluar ruangan, jarak 150 cm, uk. Marker 4x4

Percobaan	Algoritma	Akurasi Deteksi (%)	Presisi Lokasi Marker (Frm)/rate 3	Waktu Komputasi (ms/frame)
1	CLAHE	100	66	31,51
2	CLAHE	100	66	33,99
3	CLAHE	100	66	33,55
4	CLAHE	100	66	33,85
5	CLAHE	100	66	33,62
6	CLAHE	100	66	32,72
7	CLAHE	100	66	31,82
8	CLAHE	100	66	33,32
9	CLAHE	100	66	33,32
10	CLAHE	100	66	33,12
11	Kalman Filter	100	66	32,01
12	Kalman Filter	100	66	30,72
13	Kalman Filter	100	66	30,62
14	Kalman Filter	100	66	31,5
15	Kalman Filter	100	66	31,86
16	Kalman Filter	100	66	31,58
17	Kalman Filter	100	66	30,34
18	Kalman Filter	100	66	31,29
19	Kalman Filter	100	66	31,68
20	Kalman Filter	100	66	31,72
21	Adaptive Thresholding	100	66	44,92
22	Adaptive Thresholding	100	66	45,23
23	Adaptive Thresholding	100	66	43,69
24	Adaptive Thresholding	100	66	45,33
25	Adaptive Thresholding	100	66	43,3
26	Adaptive Thresholding	100	66	45,03
27	Adaptive Thresholding	100	66	44,64
28	Adaptive Thresholding	100	66	43,77
29	Adaptive Thresholding	100	66	43,47
30	Adaptive Thresholding	100	66	44,12

Tabel 2. Hasil Uji Lingkungan Malam Hari, didalam ruangan, jarak 150 cm, uk. Marker 4x4

Percobaan	Algoritma	Akurasi Deteksi (%)	Presisi Lokasi Marker (Frm)/rate 3	Waktu Komputasi (ms/frame)
1	CLAHE	100	66	31,71
2	CLAHE	100	66	34,38
3	CLAHE	100	66	32,67
4	CLAHE	100	66	33,52
5	CLAHE	100	66	34,12
6	CLAHE	100	66	32,76
7	CLAHE	100	66	33,09
8	CLAHE	100	66	34,24
9	CLAHE	100	66	33,85
10	CLAHE	100	66	33,7
11	Kalman Filter	100	66	31,75
12	Kalman Filter	100	66	31,42
13	Kalman Filter	100	66	31,41
14	Kalman Filter	100	66	30,86
15	Kalman Filter	100	66	30,8
16	Kalman Filter	100	66	31,1
17	Kalman Filter	100	66	29,58
18	Kalman Filter	100	66	30,68
19	Kalman Filter	100	66	31,12
20	Kalman Filter	100	66	30,56
21	Adaptive Thresholding	100	66	44,93
22	Adaptive Thresholding	100	66	44,77
23	Adaptive Thresholding	100	66	44,75
24	Adaptive Thresholding	100	66	44,58
25	Adaptive Thresholding	100	66	45,25
26	Adaptive Thresholding	100	66	45,23
27	Adaptive Thresholding	100	66	44,86
28	Adaptive Thresholding	100	66	45,87
29	Adaptive Thresholding	100	66	45,06
30	Adaptive Thresholding	100	66	44,87

Tabel 3. Waktu Komputasi Algoritma (Siang Hari)

Algoritma	Rata-rata (ms/frame)	Deviasi Standar (ms)
CLAHE	33,08	0,79
Kalman Filter	31,33	0,54
Adaptive Thresholding	44,35	0,73

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 bahwa Kalman Filter memiliki performa waktu komputasi paling efisien, dengan rata-rata 31,33 ms per frame dan deviasi standar terkecil yaitu 0,54 ms. Temuan ini mengindikasikan bahwa Kalman Filter tidak hanya cepat, tetapi juga konsisten dalam setiap proses deteksi marker antar frame. CLAHE mendapatkan rata-rata waktu komputasi sebesar 33,08 ms per frame, dengan deviasi standar yang relatif stabil. Adaptive Thresholding menunjukkan waktu komputasi

tertinggi di antara ketiga algoritma, yakni 44,35 ms per frame dengan deviasi standar 0,73 ms. Seluruh algoritma mampu mencapai akurasi deteksi 100%.

Tabel 4. Waktu Komputasi Algoritma (Malam Hari)

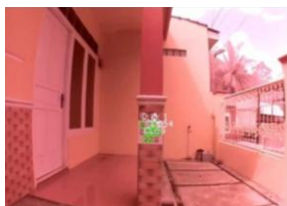
Algoritma	Rata-rata (ms/frame)	Deviasi Standar (ms)
CLAHE	33,4	0,8
Kalman Filter	30,93	0,57
Adaptive Thresholding	45,02	0,35

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4 pengujian pada kondisi malam hari Kalman Filter waktu komputasi dengan rata-rata 30,93 ms per frame dengan deviasi standar 0,57 ms. CLAHE mencatatkan rata-rata waktu komputasi sebesar 33,40 ms per frame dengan deviasi standar 0,80 ms. Adaptive Thresholding menunjukkan waktu komputasi tertinggi dengan rata-rata 45,02 ms per frame dan deviasi standar 0,35 ms. Ketiga algoritma tetap mempertahankan akurasi deteksi marker sebesar 100%.

3.2. Hasil Visualisasi Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter

Hasil dari visualisasi deteksi marker ArUco dengan menggunakan algoritma Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter dapat dijelaskan sebagai berikut.

Gambar 3 menunjukkan perbandingan hasil pencitraan Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter. Hasil citra dari Adaptive Thresholding menunjukkan kemampuannya dalam menangani variasi pencahayaan yang tidak merata. Marker ArUco yang dipasang pada tiang teras rumah berhasil terdeteksi dengan akurat meskipun terdapat bayangan dan pencahayaan yang sangat terang di beberapa area. Penggunaan algoritma ini membantu dalam proses segmentasi citra, di mana teknik thresholding adaptif memastikan marker tetap terlihat jelas meskipun pencahayaannya bervariasi. Hal ini sangat penting dalam aplikasi dunia nyata, di mana pencahayaan seringkali tidak konsisten, seperti yang terlihat dalam gambar.



Gambar Preprocessing Citra Menggunakan Adaptive Thresholding



Gambar Preprocessing Citra Menggunakan CLAHE



Gambar Preprocessing Citra Menggunakan Kalman Filter

Gambar 3. Hasil Preprocessing Citra Menggunakan Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter pada Sistem Tongkat Pintar

4. DISKUSI

Pada penelitian ini peneliti menerapkan teknik pemrosesan citra yang meliputi Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter, telah diuji untuk mendeteksi marker ArUco pada sistem tongkat pintar bagi penyandang tunanetra.

Penerapan algoritma CLAHE menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kualitas kontras citra. Masih terdapat pencahayaan tidak merata, dengan adanya bayangan di beberapa bagian dan pencahayaan berlebih di area lainnya dan berhasil meningkatkan kontras sehingga marker ArUco tetap terdeteksi dengan baik. Algoritma ini sangat efektif dalam meningkatkan kualitas citra, bahkan dalam kondisi pencahayaan yang buruk. Terdapat deteksi marker tetap konsisten antar frame. Terdapat sedikit pengaruh dari pengaturan *white balance* kamera yang memberikan nuansa kemerahan pada gambar, hal ini tidak mempengaruhi akurasi deteksi marker. Penelitian oleh Wang (2025) mengenai peningkatan pengenalan plat nomor di kondisi cahaya rendah dengan menggunakan teknik Retinex_FM dan model YOLO menunjukkan bahwa algoritma peningkatan kontras sangat berguna untuk meningkatkan deteksi dalam kondisi pencahayaan yang buruk[28]. Sejalan dengan CLAHE dalam meningkatkan visibilitas marker ArUco meskipun dalam kondisi pencahayaan yang tidak merata. Penelitian oleh Liang (2020) tentang Deep Bilateral Retinex untuk peningkatan citra di kondisi pencahayaan rendah juga mendukung penggunaan CLAHE dalam memperjelas marker di lingkungan dengan kontras rendah[29]. Wu (2024) dalam penelitiannya tentang CLAHE, Gaussian Blur, dan ROI pada aplikasi robotik menunjukkan bagaimana teknik ini dapat mengatasi masalah pencahayaan tidak merata dan meningkatkan kualitas deteksi, mirip dengan penggunaan CLAHE pada deteksi marker ArUco[30].

Hasil citra menggunakan Kalman Filter menunjukkan keunggulannya dalam melacak posisi marker secara stabil. Teknik ini memungkinkan sistem untuk memprediksi dan memuluskan posisi marker antar frame, sangat berguna dalam situasi di mana kamera bergerak atau ketika ada gangguan visual sementara. Penggunaan Kalman Filter memungkinkan sistem untuk menjaga kontinuitas deteksi marker meskipun ada variasi gerakan atau perubahan visual yang terjadi di lingkungan nyata, seperti yang terlihat di area teras rumah.

Kalman Filter juga menunjukkan keunggulannya, sebagaimana dibuktikan oleh Yu (2023) yang mengembangkan Unscented Kalman Filtering yang digabungkan dengan Feature Triangle untuk pelacakan posisi kepala yang lebih akurat[18]. Teknik ini dapat diadaptasi dalam sistem tongkat pintar untuk menjaga kontinuitas deteksi marker ArUco meskipun ada gangguan visual atau pergerakan. Penelitian oleh Klovov (2022) tentang penerapan Gauss-Hermite Kalman Filter dalam pelacakan sinyal GPS mengilustrasikan bagaimana Kalman Filter efektif dalam melacak posisi objek dalam situasi dinamis dan bergejolak, yang sangat relevan untuk menjaga kestabilan pelacakan marker dalam lingkungan yang dinamis, seperti yang terjadi pada sistem tongkat pintar[20].

Secara keseluruhan, ketiga teknik tersebut menunjukkan kemampuan masing-masing dalam menghadapi tantangan pencahayaan yang berbeda. Adaptive Thresholding efektif untuk kondisi pencahayaan variatif, CLAHE meningkatkan kontras dan menjaga kestabilan deteksi dalam lingkungan dengan pencahayaan tidak merata, sementara Kalman Filter memberikan kestabilan dalam pelacakan marker, terutama dalam situasi dinamis.

4.1. Hasil Perbandingan Pemrosesan Citra

Tiga teknik pemrosesan citra Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter diuji untuk mendeteksi marker ArUco pada sistem tongkat pintar bagi penyandang tunanetra. Setiap teknik diuji pada dua kondisi pencahayaan yang berbeda, yaitu siang hari di luar ruangan dan malam hari di dalam ruangan, dengan jarak marker 150 cm dan ukuran marker 4x4. Hasil uji menunjukkan bahwa ketiga teknik tersebut memiliki akurasi deteksi 100%, yang berarti bahwa marker ArUco berhasil terdeteksi dengan sempurna pada setiap percobaan.

CLAHE menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam kondisi siang maupun malam hari. Meskipun waktu komputasi sedikit lebih tinggi dibandingkan Kalman Filter dan Adaptive Thresholding, dengan rentang 31,51 ms hingga 34,38 ms di malam hari dan 31,51 ms hingga 33,99 ms di siang hari, CLAHE tetap mempertahankan stabilitas yang baik dalam hal akurasi dan presisi lokasi marker, yang tetap pada angka 66 di seluruh percobaan. Teknik ini berfungsi dengan baik dalam memperbaiki kontras citra yang lebih gelap, namun sedikit membutuhkan waktu lebih lama untuk memproses citra dibandingkan dengan Kalman Filter.

Kalman Filter, yang digunakan untuk memperkirakan posisi marker dengan menggunakan model dinamis, menunjukkan waktu komputasi yang lebih cepat dibandingkan CLAHE, berkisar antara 29,58 ms hingga 31,75 ms di malam hari dan 30,34 ms hingga 32,01 ms di siang hari. Teknik ini mampu mengatasi ketidakstabilan citra dan memberikan estimasi posisi marker yang akurat, sehingga lebih efisien dalam situasi yang membutuhkan respon waktu cepat. Presisi lokasi marker tetap terjaga pada angka 66, menandakan bahwa Kalman Filter memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mempertahankan deteksi marker yang akurat dengan waktu komputasi yang rendah.

Adaptive Thresholding, meskipun memberikan hasil yang sangat baik dalam akurasi deteksi dengan 100%, menunjukkan waktu komputasi yang lebih lama dibandingkan dengan kedua teknik lainnya, berkisar antara 44,58 ms hingga 45,87 ms di malam hari dan 43,3 ms hingga 45,33 ms di siang hari. Teknik ini bekerja dengan baik dalam memisahkan objek dari latar belakang berdasarkan ambang batas adaptif, meskipun membutuhkan lebih banyak waktu untuk memproses citra. Meski demikian, hasilnya tetap menunjukkan presisi lokasi marker yang konsisten pada angka 66, menandakan teknik ini dapat digunakan dengan baik pada aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi meskipun dengan sedikit peningkatan waktu komputasi.

Secara keseluruhan, Kalman Filter tampil unggul dalam hal waktu komputasi yang lebih cepat, menjadikannya pilihan yang lebih efisien untuk aplikasi yang membutuhkan respons cepat. Sementara itu, CLAHE memberikan hasil yang stabil meskipun membutuhkan waktu lebih lama, dan Adaptive Thresholding menunjukkan waktu komputasi terlama, namun tetap memberikan akurasi deteksi yang sempurna. Ketiga teknik ini menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam mendeteksi marker ArUco, dengan perbedaan utama terletak pada waktu komputasi dan efisiensinya dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi. Hasil penelitian ini penting tidak hanya untuk SLB Kuncup Mas Banyumas, tetapi juga bagi pengembangan sistem navigasi tunanetra secara umum. Optimalisasi deteksi marker ArUco melalui teknik preprocessing ini dapat diterapkan di berbagai lingkungan, meningkatkan kemandirian penyandang tunanetra. Selain itu, temuan ini berpotensi dikembangkan menjadi sistem hybrid dengan sensor tambahan seperti ultrasonik atau GPS, sehingga menghasilkan navigasi yang lebih akurat, adaptif, dan aman di berbagai kondisi.

Sejauh yang kami ketahui, ini adalah salah satu studi pertama yang melakukan analisis komparatif terhadap tiga teknik pemrosesan citra, yaitu Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter, dalam sistem navigasi berbasis marker ArUco untuk tongkat pintar. Studi ini tidak hanya mengukur akurasi deteksi, tetapi juga mengevaluasi aspek waktu komputasi di berbagai kondisi pencahayaan, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait performa masing-masing algoritma dalam aplikasi navigasi tunanetra.

4.4 Imasi Hasil

Implikasi dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ketiga teknik pemrosesan citra Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter memiliki kinerja yang sangat baik dalam mendeteksi marker ArUco pada sistem tongkat pintar untuk penyandang tunanetra, dengan akurasi deteksi mencapai 100% di berbagai kondisi pencahayaan. Hasil ini memberikan dampak positif dalam pengembangan teknologi

assistive untuk penyandang disabilitas, khususnya dalam meningkatkan sistem orientasi dan mobilitas tunanetra.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil melakukan evaluasi komparatif terhadap tiga teknik pemrosesan citra, yaitu Adaptive Thresholding, CLAHE, dan Kalman Filter, dalam mendeteksi marker ArUco untuk sistem tongkat pintar bagi penyandang tunanetra. Hasil analisis menunjukkan bahwa Kalman Filter memberikan kinerja waktu komputasi terbaik dan paling stabil, menjadikannya opsi yang lebih efisien untuk aplikasi real-time yang memerlukan respons cepat. CLAHE dan Adaptive Thresholding menunjukkan performa lebih baik dalam kondisi pencahayaan yang kurang ideal, meskipun dengan waktu proses yang lebih tinggi.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pemetaan performa ketiga metode pemrosesan citra dalam konteks sistem navigasi berbasis marker visual, yang belum banyak diungkap dalam studi sejenis. Hasilnya dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem visi komputer real-time dan perangkat embedded assistive technology, khususnya dalam aplikasi mobilitas untuk penyandang disabilitas penglihatan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa penggunaan marker dengan ukuran tunggal (4×4), sehingga generalisasi terhadap ukuran marker lain masih perlu diuji. Penelitian di masa mendatang dapat mengeksplorasi pengaruh ukuran marker yang berbeda, integrasi sistem dengan deteksi rintangan, serta fusi multi-sensor seperti ultrasonik untuk meningkatkan akurasi dan keandalan deteksi dalam berbagai kondisi lingkungan. Pengembangan sistem hybrid yang mampu menyesuaikan teknik preprocessing secara adaptif terhadap kondisi pencahayaan juga menjadi arah penelitian yang menjanjikan dalam mendukung pengembangan sistem navigasi cerdas berbasis marker untuk penyandang tunanetra di lingkungan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sampathkrishna, "ArUco Marker based localization and Node graph approach to mapping," 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2208.09355>
- [2] A. van Putten, M. F. Giersberg, and T. B. Rodenburg, "Tracking laying hens with ArUco marker backpacks," *Smart Agric. Technol.*, vol. 10, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2024.100703.
- [3] S. Afsha and M. M. Sazid, "AR-TurtleSLAM: EKF-based Localization and Mapping using ArUco Feature Detection on Mobile Robots," 2024. doi: 10.1109/COMPAS60761.2024.10797053.
- [4] S. Chatterjee, D. Doan, and B. Calli, "Utilizing Inpainting for Training Keypoint Detection Algorithms Towards Markerless Visual Servoing," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2024, pp. 3086–3092. doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10610006.
- [5] L. Yan and L. Zhao, "An approach on advanced unscented kalman filter from mobile robot-slam," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2020, vol. 43, no. B4, pp. 381–390. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-381-2020.
- [6] M. Ahmad and R. Mohd-Mokhtar, "Adaptive Threshold-based Fault Detection for Systems Exposed to Model Uncertainty and Deterministic Disturbance," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, pp. 3107–3124, 2023, doi: 10.47836/pjst.31.6.26.
- [7] A. Abdusalomov *et al.*, "Automatic salient object extraction based on locally adaptive thresholding to generate tactile graphics," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, p. 3350, 2020, doi: 10.3390/app10103350.
- [8] C. Liu, F. Xie, X. Dong, H. Gao, and H. Zhang, "Small Target Detection from Infrared Remote Sensing Images Using Local Adaptive Thresholding," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 15, pp. 1941–1952, 2022, doi: 10.1109/JSTARS.2022.3151928.

-
- [9] X. Deng, J. Deng, and Z. Deng, "Adaptive Corner Detection Algorithm Based on OTSU Threshold Segmentation," in *2024 IEEE 9th International Conference on Computational Intelligence and Applications, ICCIA 2024*, 2024, pp. 120–124. doi: 10.1109/ICCIA62557.2024.10719234.
- [10] T. Wu, H. Song, H. Gao, Z. Wu, and F. Han, "Adaptive Dynamic Thresholding Method for Fault Detection in Diesel Engine Lubrication Systems," *Machines*, vol. 12, no. 12, 2024, doi: 10.3390/machines12120895.
- [11] S. Lu, Y. Zhao, and Y. Zhao, "A Motion Object Detection Algorithm Based on Adaptive Thresholding," 2023. doi: 10.1109/ICSPCC59353.2023.10400265.
- [12] W. Kong, J. Chen, Y. Song, Z. Fang, X. Yang, and H. Zhang, "Sobel Edge Detection Algorithm with Adaptive Threshold based on Improved Genetic Algorithm for Image Processing," 2023. [Online]. Available: <http://www.ijacsa.thesai.org>
- [13] L. Makabe, H. Santo, F. Okura, and Y. Matsushita, "Shape-coded ArUco: Fiducial Marker for Bridging 2D and 3D Modalities," in *Proceedings - 2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2022*, 2022, pp. 2315–2324. doi: 10.1109/WACV51458.2022.00237.
- [14] X. T. Hu Xiao-Fei Deng, S. Q. Zhao Qin Guo Cui-Xia Zeng, and K. Q. Zhou, "Comparative Study on Application of Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter in Target Tracking," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 864, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/864/1/012055.
- [15] Z. Jiang, S. Ma, Z. Li, X. Jiang, J. Chen, and Y. Li, "A Mobile Robot Indoor Positioning System Based on ArUco Array and Extended Kalman Filter," in *Proceedings - 2023 China Automation Congress, CAC 2023*, 2023, pp. 562–567. doi: 10.1109/CAC59555.2023.10450326.
- [16] H. C. Kam, Y. K. Yu, and K. H. Wong, "An Improvement on ArUco Marker for Pose Tracking Using Kalman Filter Cheun Kam Ho , Ying Kin Yu , and Kin Hong Wong , " An Improvement on ArUco Marker for Pose Tracking Using Kalman Filter ", 19th IEEE / ACIS International Conference on Software Engineering , Artificial Intelligence , Networking and Parallel / Distributed Computing (SNPD 2018) , Novotel An Improvement on ArUco Marker for Pose Tracking Using Kalman Filter," no. April, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/SNPD.2018.8441049.
- [17] Z. Mu, H. Liu, and S. Zhang, "A Multiple-Step, Randomly Delayed, Robust Cubature Kalman Filter for Spacecraft-Relative Navigation," *Aerospace*, 2023, doi: 10.3390/aerospace10030289.
- [18] S. Yu, L. Wang, and J. Zhang, "An Improved Unscented Kalman Filtering Combined with Feature Triangle for Head Position Tracking," *Electronics*, 2023, doi: 10.3390/electronics12122665.
- [19] V. Mkhoyan, J. Ramos, and T. Walker, "Adaptive State Estimation and Real-Time tracking of Aeroelastic Wings with Augmented Kalman filter and Kernelized Correlation Filter," *J. Aerosp. Eng.*, 2021, doi: 10.2514/6.2021-0666.
- [20] D. Klovov, X. Yu, and H. Wang, "A Novel Carrier Tracking Approach for GPS Signals Based on Gauss–Hermite Kalman Filter," *Electronics*, 2022, doi: 10.3390/electronics11142215.
- [21] M. Bagherzadeh and A. Toosizadeh, "Eye Tracking Algorithm Based on Multi Model Kalman Filter," *Hightech Innov. J.*, 2022, doi: 10.28991/hij-2022-03-01-02.
- [22] A. Babu and C. Eswaran, "Performance Analysis of Path Tracking Using Multi-Dimensional Kalman Filter Based on State Estimations," *J. Control Syst. Eng.*, 2021, doi: 10.36227/techrxiv.15129843.v1.
- [23] Z. Zhuang, X. Li, J. Wang, M. Dai, and S. Ma, "An Adaptive Threshold Detection Circuit for Action Potential," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2290, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/2290/1/012003.
- [24] R. Berral-Soler, R. Muñoz-Salinas, R. Medina-Carnicer, and M. J. Marín-Jiménez, "DeepArUco++: Improved detection of square fiducial markers in challenging lighting conditions," *Image Vis. Comput.*, vol. 152, p. 105313, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2024.105313>.
- [25] M. Tanzib Hosain, A. Zaman, M. R. Abir, S. Akter, S. Mursalin, and S. S. Khan, "Synchronizing Object Detection: Applications, Advancements and Existing Challenges," *IEEE Access*, vol. 12,
-

-
- pp. 54129–54167, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3388889.
- [26] J. Zhao *et al.*, “An improved unscented kalman filter applied to positioning and navigation of autonomous underwater vehicles,” *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 551, 2025, doi: 10.3390/s25020551.
- [27] T. Liang, K. Li, Y. Wang, and M. Wang, “Optimized adaptive filtering for fault estimation of the dynamics of high-speed train based on robust extended kalman filter,” *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 45, no. 14, pp. 2688–2711, 2023, doi: 10.1177/01423312231160202.
- [28] X. Wang, “Enhancing license plate recognition in low-light conditions using Retinex_FM and YOLO model,” *Aerospace*, 2025, doi: 10.1117/12.3056113.
- [29] J. Liang, Y. Zhang, and X. Li, “Deep Bilateral Retinex for Low-Light Image Enhancement,” *arXiv*, 2020, doi: 10.48550/arxiv.2007.02018.
- [30] Y. Wu, “Enhancing Object Sorting Under Low-Light Conditions with CLAHE, Gaussian Blur, ROI, and Custom PID on a Raspberry Pi Robotic Arm,” *Appl. Comput. Eng.*, 2024, doi: 10.54254/2755-2721/96/20241240.

