

## Reduksi Noise Sensor *Electrooculography* Menggunakan Filter Kalman pada Kendali Mobile Robot

Adi Ahmad Fauzi<sup>1\*</sup>, Sri Suryani<sup>2</sup>, Hendra Widodo<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Muhammadiyah Lampung; Jl. Prof. Dr. Hamka, Sukarame Baru, Sukarame, Kota Bandar Lampung. 35131; 08117811414;

Received: 19-12-2025

Accepted: 27-01-2026

### Keywords:

Electrooculography (EOG);  
Filter Kalman; mobile robot;  
pengolahan sinyal; kendali  
berbasis mata.

### Correspondent Email:

[adiaahmadfauzi@gmail.com](mailto:adiaahmadfauzi@gmail.com)

**Abstrak.** Penggunaan *Electrooculography* (EOG) sebagai antarmuka kendali mobile robot menghadapi permasalahan utama berupa noise yang menurunkan kualitas sinyal dan akurasi sistem kendali. Penelitian ini mengkaji penerapan Filter Kalman untuk mereduksi noise pada data sensor EOG dalam sistem kendali mobile robot berbasis gerakan mata manusia. Metode penelitian meliputi perancangan modul sensor EOG, implementasi algoritma Filter Kalman, serta evaluasi kinerja sistem menggunakan Mean Squared Error (MSE) dengan variasi parameter noise pengukuran ( $R$ ) dan noise proses ( $Q$ ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi parameter  $R = 10$  dan  $Q = 1$  menghasilkan keseimbangan optimal antara peredaman noise dan pelestarian karakteristik sinyal asli. Integrasi Filter Kalman terbukti meningkatkan stabilitas sinyal, akurasi, serta responsivitas sistem kendali mobile robot terhadap perintah gerakan mata. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan sistem kendali robot berbasis EOG yang lebih andal dan efisien untuk interaksi manusia-robot.

**Abstract.** The use of *Electrooculography* (EOG) as an interface for mobile robot control faces major challenges due to noise that degrades signal quality and control accuracy. This study investigates the application of the Kalman Filter to reduce noise in EOG sensor data for eye-based mobile robot control systems. The research methodology includes the design of an EOG sensor module, implementation of the Kalman Filter algorithm, and system performance evaluation using Mean Squared Error (MSE) with various measurement noise ( $R$ ) and process noise ( $Q$ ) parameters. Experimental results indicate that the parameter configuration of  $R = 10$  and  $Q = 1$  provides an optimal balance between noise suppression and preservation of the original signal characteristics. The integration of the Kalman Filter improves signal stability, accuracy, and responsiveness of the mobile robot control system to eye movement commands. These findings contribute to the development of more reliable and efficient EOG-based human-robot interaction systems..

## 1. PENDAHULUAN

Pengembangan sistem kendali robot berbasis interaksi alami manusia-mesin menjadi salah satu fokus utama dalam bidang robotika dan teknologi elektro. Pendekatan ini bertujuan untuk menciptakan sistem kendali yang lebih intuitif, mudah digunakan, serta mampu meningkatkan kenyamanan dan

aksesibilitas pengguna. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan sinyal biopotensial manusia sebagai sumber masukan, khususnya sinyal *Electrooculography* (EOG) yang merekam aktivitas listrik akibat pergerakan bola mata. Penggunaan gerakan mata sebagai media kendali menawarkan solusi alternatif yang

menjanjikan, terutama bagi pengguna dengan keterbatasan fisik, serta mendukung pengembangan sistem kendali mobile robot berbasis interaksi alami [1], [2], [3].

EOG telah banyak digunakan dalam sistem Human–Machine Interface (HMI) dan Human–Robot Interaction (HRI) karena kemampuannya mendeteksi arah pandang mata secara langsung melalui elektroda yang ditempatkan di sekitar mata [2], [10]. Namun, sinyal EOG memiliki karakteristik yang rentan terhadap noise dan artefak, seperti kedipan mata, aktivitas otot wajah, pergerakan kepala, serta gangguan lingkungan [4], [6]. Keberadaan noise ini dapat menurunkan kualitas sinyal, menyebabkan kesalahan interpretasi gerakan mata, dan berdampak pada ketidakstabilan serta penurunan akurasi sistem kendali mobile robot. Berbagai metode pemrosesan sinyal telah diterapkan untuk meningkatkan kualitas sinyal EOG, salah satunya adalah Filter Kalman. Filter Kalman merupakan algoritma estimasi rekursif yang mampu mereduksi noise secara adaptif dengan tetap mempertahankan karakteristik utama sinyal [7], [15]. Dibandingkan dengan metode penyaringan konvensional, Filter Kalman memiliki keunggulan dalam menyeimbangkan antara hasil pengukuran dan model sistem melalui pengaturan parameter noise proses ( $Q$ ) dan noise pengukuran ( $R$ ) [9]. Karakteristik tersebut menjadikan Filter Kalman sesuai untuk aplikasi real-time, termasuk pada sistem kendali mobile robot berbasis sinyal EOG.

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan keberhasilan penggunaan EOG sebagai antarmuka kendali pada sistem kursi roda listrik maupun perangkat robotik lainnya [1], [3]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa penerapan teknik pemrosesan sinyal lanjutan dan pendekatan berbasis Kalman Filter mampu meningkatkan kualitas sinyal biomedik serta kinerja sistem klasifikasi dan estimasi sinyal [7], [8], [10]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada implementasi metode atau klasifikasi sinyal, sementara kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi parameter Filter Kalman terhadap keseimbangan antara reduksi noise dan responsivitas sistem kendali mobile robot berbasis EOG masih terbatas.

Oleh karena itu, *research gap* dalam penelitian ini adalah belum adanya kajian yang

secara sistematis mengevaluasi konfigurasi parameter Filter Kalman yang optimal untuk pengolahan sinyal EOG pada sistem kendali mobile robot, dengan mempertimbangkan kualitas sinyal dan kinerja kendali secara bersamaan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan Filter Kalman pada pengolahan sinyal EOG dalam sistem kendali mobile robot berbasis gerakan mata manusia serta mengevaluasi pengaruh variasi parameter  $Q$  dan  $R$  terhadap kualitas sinyal dan respons sistem. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan analisis eksperimental mengenai konfigurasi parameter Filter Kalman yang mampu memberikan keseimbangan terbaik antara reduksi noise dan ketuhan karakteristik sinyal, sehingga meningkatkan stabilitas, akurasi, dan responsivitas sistem kendali mobile robot berbasis EOG.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. *Electrooculography* (EOG)

*Electrooculography* (EOG) merupakan teknik pengukuran sinyal biopotensial yang memanfaatkan perbedaan potensial listrik antara kornea dan retina akibat pergerakan bola mata. Mata manusia dapat dimodelkan sebagai sebuah dipol listrik, sehingga pergerakan bola mata ke arah tertentu menghasilkan perubahan distribusi potensial yang dapat dideteksi menggunakan elektroda yang ditempatkan di sekitar mata [12]. Sinyal EOG banyak dimanfaatkan dalam aplikasi *Human–Machine Interface* (HMI) dan *Human–Robot Interaction* (HRI) karena kemampuannya mendeteksi arah pandang mata secara langsung serta kemudahan implementasi perangkat kerasnya [2].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sinyal EOG dapat digunakan sebagai sumber masukan yang andal untuk sistem kendali, seperti kendali kursi roda listrik dan perangkat robotik [1], [3]. Namun, sinyal EOG memiliki kelemahan utama berupa sensitivitas yang tinggi terhadap noise, yang berasal dari kedipan mata, aktivitas otot wajah, serta pergerakan kepala [4], [6]. Gangguan-gangguan tersebut menyebabkan fluktuasi amplitudo yang dapat menurunkan akurasi deteksi gerakan mata dan berdampak langsung pada kinerja sistem kendali.

## 2.2. Sistem Kendali Mobile Robot Berbasis Gerakan Mata

Sistem kendali berbasis gerakan mata memanfaatkan sinyal EOG atau estimasi arah pandang mata sebagai masukan untuk menghasilkan perintah kendali, seperti maju, mundur, belok kiri, dan belok kanan. Pendekatan ini menawarkan interaksi yang lebih alami dibandingkan perangkat input konvensional dan telah banyak diterapkan pada sistem bantu dan robot bergerak [1], [10]. Keberhasilan sistem kendali ini sangat bergantung pada kualitas sinyal masukan, karena kesalahan kecil pada interpretasi sinyal dapat menghasilkan perintah yang tidak diinginkan.

Beberapa penelitian melaporkan bahwa peningkatan kualitas sinyal melalui tahap prapemrosesan (*preprocessing*) merupakan faktor kunci dalam meningkatkan akurasi sistem kendali berbasis EOG [2], [6]. Oleh karena itu, pemilihan metode pemrosesan sinyal yang tepat menjadi aspek penting dalam perancangan sistem kendali mobile robot berbasis gerakan mata.

## 2.3. Filter Kalman dalam Pemrosesan Sinyal Biomedik

Filter Kalman merupakan algoritma estimasi optimal untuk sistem linier yang mempertimbangkan keberadaan noise pada proses dan pengukuran [15]. Algoritma ini bekerja secara rekursif melalui tahap prediksi dan koreksi, sehingga cocok untuk aplikasi real-time dengan kebutuhan komputasi yang relatif rendah [9]. Dalam pemrosesan sinyal biomedik, Filter Kalman telah digunakan untuk mereduksi noise sekaligus mempertahankan karakteristik utama sinyal [7].

Penerapan Filter Kalman pada sinyal berbasis pandangan mata atau gaze tracking dilaporkan mampu meningkatkan kestabilan sinyal dan akurasi estimasi arah pandang [7]. Selain itu, pendekatan berbasis Kalman Filter juga dikombinasikan dengan metode pembelajaran mesin untuk meningkatkan kinerja klasifikasi sinyal biomedik [8]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan potensi Filter Kalman sebagai metode yang efektif untuk pemrosesan sinyal EOG.

## 2.4. Evaluasi Kinerja Menggunakan Mean Squared Error (MSE)

*Mean Squared Error* (MSE) merupakan metrik yang umum digunakan untuk mengukur perbedaan rata-rata kuadrat antara sinyal hasil estimasi dan sinyal referensi. Metrik ini banyak digunakan dalam evaluasi algoritma pemrosesan sinyal karena mampu memberikan ukuran kuantitatif tingkat kesalahan [13], [14]. Nilai MSE yang kecil menunjukkan bahwa sinyal hasil pemrosesan memiliki kedekatan yang tinggi terhadap sinyal referensi

Namun, dalam konteks sistem kendali real-time, nilai MSE yang rendah tidak selalu menjamin kinerja sistem yang terbaik. Oleh karena itu, evaluasi kinerja Filter Kalman pada penelitian ini tidak hanya didasarkan pada nilai MSE, tetapi juga dikombinasikan dengan analisis kestabilan sinyal dan respons sistem kendali mobile robot.

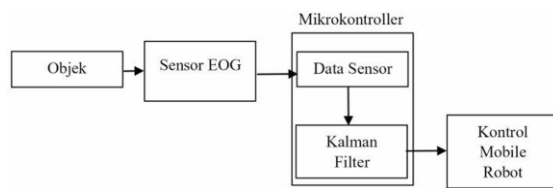
## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja Filter Kalman dalam mereduksi noise pada sinyal *Electrooculography* (EOG) yang digunakan sebagai input sistem kendali mobile robot. Eksperimen dilakukan dengan membandingkan kualitas sinyal EOG sebelum dan sesudah penerapan Filter Kalman berdasarkan nilai *Mean Squared Error* (MSE) serta pengaruhnya terhadap respons sistem kendali robot.

### 3.2. Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga bagian utama, yaitu modul akuisisi sinyal *Electrooculography* (EOG), unit pemrosesan sinyal, dan sistem kendali mobile robot. Modul akuisisi sinyal EOG berfungsi menangkap sinyal biopotensial akibat pergerakan bola mata melalui elektroda yang ditempatkan di sekitar mata. Sinyal analog yang diperoleh selanjutnya diperkuat dan dikonversi menjadi sinyal digital untuk diproses lebih lanjut.



Gambar 1. Diagram blok sistem kendali mobile robot berbasis sinyal *Electrooculography* (EOG) dengan penerapan Filter Kalman.

Berdasarkan Gambar 1, sinyal EOG yang telah diakuisisi diproses menggunakan Filter Kalman untuk mereduksi noise sebelum digunakan sebagai input penentuan arah gerak mobile robot. Hasil pemrosesan sinyal selanjutnya diinterpretasikan menjadi perintah kendali yang dieksekusi oleh sistem kendali mobile robot sesuai dengan arah gerakan mata pengguna.

Unit pemrosesan sinyal bertugas mengimplementasikan algoritma Filter Kalman untuk mereduksi noise pada sinyal EOG. Sinyal hasil pemrosesan kemudian digunakan sebagai input keputusan untuk menentukan arah gerak mobile robot, seperti maju, mundur, belok kiri, dan belok kanan. Sistem kendali mobile robot mengeksekusi perintah berdasarkan hasil interpretasi sinyal EOG yang telah difilter.

### 3.3. Implementasi Filter Kalman

Filter Kalman diimplementasikan sebagai algoritma estimasi rekursif dengan dua tahap utama, yaitu prediksi dan koreksi. Pada tahap prediksi, estimasi keadaan sinyal EOG dihitung berdasarkan model sistem sebelumnya dan matriks noise proses ( $Q$ ). Pada tahap koreksi, estimasi tersebut diperbarui menggunakan data pengukuran aktual dengan mempertimbangkan matriks noise pengukuran ( $R$ ).

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian dengan beberapa variasi nilai parameter  $Q$  dan  $R$  untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kualitas sinyal hasil pemrosesan. Variasi parameter tersebut digunakan untuk menentukan konfigurasi Filter Kalman yang menghasilkan keseimbangan optimal antara peredaman noise dan pelestarian karakteristik sinyal EOG.

### 3.4. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan dengan merekam sinyal EOG pada beberapa kondisi pergerakan mata yang merepresentasikan perintah kendali mobile robot. Data sinyal EOG mentah kemudian diproses menggunakan Filter Kalman dengan variasi parameter yang telah ditentukan. Sinyal hasil pemrosesan dibandingkan dengan sinyal awal untuk mengevaluasi tingkat reduksi noise.

Selain analisis sinyal, pengujian juga dilakukan pada sistem kendali mobile robot untuk mengamati respons robot terhadap perintah gerakan mata. Parameter yang diamati meliputi kestabilan respons dan kesesuaian arah gerak robot dengan perintah yang diberikan.

### 3.5. Teknik Analisis Data

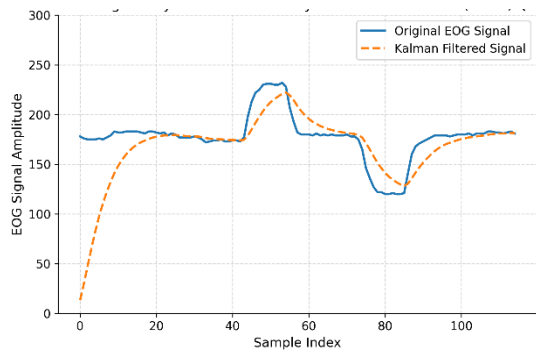
Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan *Mean Squared Error* (MSE) untuk mengukur perbedaan antara sinyal EOG sebelum dan sesudah difilter. Nilai MSE yang lebih kecil menunjukkan kualitas pemrosesan sinyal yang lebih baik. Hasil analisis MSE digunakan sebagai dasar untuk menentukan konfigurasi parameter Filter Kalman yang paling optimal.

Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi serta mendukung pembahasan mengenai pengaruh Filter Kalman terhadap kualitas sinyal EOG dan kinerja sistem kendali mobile robot.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Akuisisi dan Pemrosesan Sinyal EOG

Sinyal *Electrooculography* (EOG) yang diperoleh dari modul sensor menunjukkan adanya fluktuasi amplitudo yang cukup signifikan akibat pengaruh noise. Noise tersebut terutama berasal dari kedipan mata, aktivitas otot wajah, serta gangguan lingkungan, sehingga menyebabkan sinyal EOG mentah memiliki pola yang tidak stabil.



Gambar 2. Perbandingan sinyal EOG sebelum dan sesudah pemrosesan menggunakan Filter Kalman dengan parameter  $R = 25$  dan  $Q = 1$ .

Berdasarkan Gambar 2, penerapan Filter Kalman dengan parameter  $R = 25$  dan  $Q = 1$  menghasilkan sinyal EOG yang lebih halus dan stabil dibandingkan sinyal asli, tanpa menghilangkan karakteristik utama pergerakan mata. Konfigurasi ini menunjukkan keseimbangan antara peredaman noise dan responsivitas sistem, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi kendali mobile robot secara real-time.

Setelah diterapkan Filter Kalman, sinyal EOG mengalami peningkatan kualitas yang ditunjukkan oleh pola sinyal yang lebih halus dan stabil. Filter Kalman mampu mereduksi fluktuasi amplitudo tanpa menghilangkan karakteristik utama sinyal yang merepresentasikan arah gerakan mata. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma Filter Kalman efektif dalam meminimalkan pengaruh noise pada sinyal EOG.

#### 4.2. Analisis Pengaruh Parameter Filter Kalman

Untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter Filter Kalman terhadap kualitas sinyal *Electrooculography* (EOG), dilakukan pengujian dengan beberapa kombinasi nilai noise pengukuran ( $R$ ) dan noise proses ( $Q$ ). Kinerja setiap konfigurasi parameter dianalisis secara kuantitatif menggunakan *Mean Squared Error* (MSE), di mana nilai MSE yang lebih kecil menunjukkan tingkat kedekatan yang lebih tinggi antara sinyal hasil pemrosesan dan sinyal referensi.

Tabel 1. Evaluasi kinerja Filter Kalman pada variasi nilai  $R$  ( $Q = 1$ )

No	Nilai R	Deskripsi Hasil	MSE	Catatan
1	1	Hasil sangat sensitif terhadap kebisingan	43.28	Sinyal mengikuti fluktuasi noise
2	5	Sensitivitas terhadap kebisingan masih terlihat	293.03	Reduksi noise belum optimal
3	10	Filter lebih stabil dengan respons seimbang	539.39	Kondisi optimal untuk kendali robot
4	25	Filter sangat halus dengan respons melambat	1068.90	Terjadi keterlambatan respons
5	50	Respons sangat lambat dan kehilangan detail sinyal	1683.87	<i>Over-smoothing</i> pada sinyal

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa nilai MSE cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya nilai  $R$ . Konfigurasi dengan  $R = 1$  menghasilkan nilai MSE terendah, namun secara visual sinyal hasil pemrosesan masih menunjukkan fluktuasi yang cukup besar akibat sensitivitas tinggi terhadap noise. Hal ini menunjukkan bahwa nilai MSE terendah tidak selalu merepresentasikan konfigurasi terbaik untuk aplikasi kendali mobile robot.

Oleh karena itu, pemilihan parameter optimal pada penelitian ini tidak hanya didasarkan pada nilai MSE, tetapi juga mempertimbangkan kestabilan sinyal dan responsivitas sistem. Berdasarkan kombinasi kriteria tersebut, konfigurasi  $R = 10$  dan  $Q = 1$  dipilih sebagai parameter yang memberikan keseimbangan terbaik antara reduksi noise dan pelestarian karakteristik sinyal.

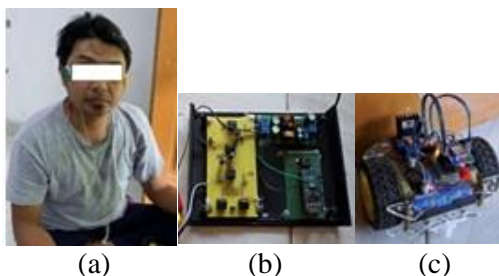
Nilai  $R$  yang kecil menyebabkan Filter Kalman lebih mempercayai data pengukuran, sehingga noise pada sinyal EOG masih ikut terpropagasi ke dalam hasil estimasi. Sebaliknya, nilai  $R$  yang besar membuat filter lebih mengandalkan model sistem, menghasilkan sinyal yang lebih halus namun berpotensi menghilangkan detail penting serta menurunkan kecepatan respons terhadap

perubahan sinyal. Fenomena ini menunjukkan adanya trade-off antara tingkat peredaman noise dan kemampuan sistem dalam merespons dinamika sinyal EOG.

Selain itu, variasi parameter  $Q$  juga memengaruhi karakteristik sinyal hasil pemrosesan. Nilai  $Q$  yang terlalu kecil membuat sistem kurang responsif terhadap perubahan sinyal, sedangkan nilai  $Q$  yang terlalu besar dapat menyebabkan fluktuasi yang tidak diinginkan. Dengan demikian, pemilihan parameter  $Q$  dan  $R$  harus dilakukan secara seimbang sesuai dengan kebutuhan aplikasi kendali *real-time*.

#### 4.3. Implementasi dan Integrasi Sistem EOG dengan Mobile Robot

Sistem yang dikembangkan terdiri atas modul akuisisi sinyal EOG, unit pemrosesan sinyal, dan sistem kendali mobile robot. Modul EOG dipasang pada area sekitar mata pengguna untuk menangkap sinyal biopotensial akibat pergerakan bola mata. Sinyal tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler yang mengimplementasikan algoritma Filter Kalman sebelum digunakan sebagai dasar penentuan perintah gerak robot.



Gambar 3. Hasil skenario integrasi sensor EOG dengan perangkat mobile robot melalui koneksi Wi-Fi, (a) Pemasangan elektroda pada wajah, (b) Modul Sensor EOG, (c) Robot mobile berkomunikasi menggunakan Wi-Fi sebagai penerima.

Gambar 3 memperlihatkan realisasi dan kondisi operasi sistem terintegrasi antara modul sensor *Electrooculography* (EOG) dan mobile robot. Sistem mampu menerima sinyal EOG secara *real-time*, memprosesnya menggunakan Filter Kalman, dan mengonversinya menjadi perintah gerak robot seperti maju, mundur, belok kiri, dan belok kanan.

#### 4.4. Evaluasi Kinerja Sistem Kendali Mobile Robot

Sinyal *Electrooculography* (EOG) yang telah diproses menggunakan Filter Kalman selanjutnya digunakan sebagai masukan sistem kendali mobile robot. Evaluasi kinerja dilakukan dengan mengamati respons robot terhadap perintah gerakan mata pada beberapa skenario pengujian, seperti perintah maju, mundur, belok kiri, dan belok kanan.

Pada kondisi tanpa pemrosesan sinyal, sistem kendali menunjukkan respons yang kurang stabil, ditandai dengan pergerakan robot yang tidak konsisten serta munculnya perintah yang tidak diinginkan akibat fluktuasi sinyal EOG. Kondisi ini mengindikasikan bahwa noise pada sinyal EOG secara langsung berdampak negatif terhadap akurasi interpretasi perintah.

Setelah penerapan Filter Kalman, khususnya dengan konfigurasi parameter  $R = 10$  dan  $Q = 1$ , respons sistem kendali menunjukkan peningkatan yang signifikan. Robot mampu merespons perintah dengan lebih stabil dan konsisten, serta menunjukkan penurunan kesalahan interpretasi arah gerak. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas sinyal EOG melalui proses penyaringan berdampak langsung pada kinerja sistem kendali mobile robot.

Dibandingkan dengan konfigurasi parameter lain, penggunaan parameter yang terlalu kecil menyebabkan sistem masih sensitif terhadap noise, sedangkan parameter yang terlalu besar menyebabkan keterlambatan respons robot. Temuan ini memperkuat hasil analisis parameter pada Subbab 4.2, bahwa pemilihan parameter Filter Kalman yang seimbang menjadi faktor penting dalam menjamin keandalan sistem kendali *real-time*. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa integrasi Filter Kalman dengan sistem kendali mobile robot berbasis EOG mampu meningkatkan stabilitas, akurasi, dan responsivitas sistem. Dengan demikian, pendekatan yang diusulkan pada penelitian ini layak digunakan sebagai solusi untuk meningkatkan kinerja sistem kendali robot berbasis gerakan mata.

#### 4.5. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Filter Kalman pada pengolahan

sinyal EOG mampu meningkatkan kualitas sinyal secara signifikan. Peningkatan ini ditandai dengan berkurangnya fluktuasi amplitudo akibat noise serta terjaganya pola utama sinyal yang merepresentasikan pergerakan mata.

Analisis variasi parameter Filter Kalman mengindikasikan bahwa keberhasilan metode ini tidak hanya ditentukan oleh algoritma yang digunakan, tetapi juga sangat bergantung pada konfigurasi parameter. Parameter yang tidak sesuai dapat menghasilkan sistem yang masih sensitif terhadap noise atau sistem yang terlalu lambat merespons perubahan sinyal. Hal ini menunjukkan bahwa Filter Kalman memerlukan proses penalaan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik sinyal dan kebutuhan aplikasi.

Secara praktis, temuan ini menegaskan bahwa sistem kendali berbasis EOG tidak dapat hanya mengandalkan satu metrik evaluasi seperti MSE. Meskipun MSE memberikan gambaran kuantitatif tingkat kesalahan, kinerja sistem kendali lebih dipengaruhi oleh keseimbangan antara kestabilan sinyal dan kecepatan respons. Oleh karena itu, pendekatan evaluasi multi-kriteria menjadi penting dalam perancangan sistem kendali real-time.

Integrasi sinyal EOG hasil pemrosesan ke dalam sistem kendali mobile robot menunjukkan bahwa peningkatan kualitas sinyal secara langsung berdampak pada peningkatan stabilitas dan akurasi pergerakan robot. Dengan demikian, tahap prapemrosesan sinyal merupakan komponen krusial dalam sistem kendali berbasis biosinyal.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan peningkatan kinerja sistem, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain pengujian dilakukan pada jumlah subjek dan skenario yang terbatas serta penggunaan MSE sebagai metrik kuantitatif utama. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan lebih banyak subjek, skenario yang lebih beragam, serta menambahkan metrik evaluasi lain seperti *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) atau tingkat keberhasilan klasifikasi perintah.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Penerapan Filter Kalman pada pengolahan sinyal Electrooculography (EOG) terbukti efektif dalam mereduksi noise tanpa menghilangkan karakteristik utama sinyal yang merepresentasikan gerakan mata.
- b. Variasi parameter noise pengukuran (R) dan noise proses (Q) pada Filter Kalman berpengaruh signifikan terhadap kualitas sinyal EOG. Konfigurasi parameter  $R = 10$  dan  $Q = 1$  dipilih sebagai parameter terbaik karena memberikan keseimbangan antara reduksi noise, kestabilan sinyal, dan responsivitas sistem, sehingga sesuai untuk aplikasi kendali mobile robot secara *real-time*.
- c. Peningkatan kualitas sinyal EOG melalui penerapan Filter Kalman berdampak langsung pada peningkatan stabilitas, akurasi, dan konsistensi respons sistem kendali mobile robot terhadap perintah gerakan mata.
- d. Sistem kendali mobile robot berbasis EOG yang dikembangkan pada penelitian ini menunjukkan potensi untuk diterapkan pada aplikasi interaksi manusia-robot, khususnya sebagai alternatif antarmuka kendali bagi pengguna dengan keterbatasan fisik.

Sebagai pengembangan selanjutnya, penelitian ini dapat diperluas dengan menggabungkan Filter Kalman dengan metode kecerdasan buatan atau logika fuzzy, serta menguji sistem pada skenario dan jumlah subjek yang lebih beragam serta menambahkan metrik evaluasi lain guna meningkatkan keandalan dan generalisasi sistem.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini, baik secara akademik maupun teknis.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Choudhuri, P. Porwal, V. Jonnalagadda, and F. Mériaudeau, "An electrooculography-based human-machine interface for wheelchair

- control,” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 673–685, 2019.
- [2] L. Y. Deng, C. L. Hsu, T. C. Lin, J. S. Tuan, and S. M. Chang, “EOG-based human–computer interface system development,” *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 3337–3343, 2010.
- [3] B. R. Baren, L. Boquete, M. Mazo, and E. López, “Wheelchair guidance strategies using EOG,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 279–299, 2002.
- [4] A. Anchan, A. Pillay, A. Kale, A. Bhadracha, and S. P. Ram, “Optimal bipolar lead placement in electrooculography (EOG): A comparative study with an emphasis on prolonged blinks,” in *Proceedings of the International Conference on Biomedical Engineering*, 2020.
- [5] M. R. Kim and G. Yoon, “Control signal from EOG analysis and its application,” in *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, 2013.
- [6] A. B. Kanwade, R. V. Gone, S. J. Ahire, and A. R. Borkar, “Study of EOG signal generation, analysis, and acquisition system,” *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 227–230, 2017.
- [7] M. Toivanen, “An advanced Kalman filter for gaze tracking signal,” *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 270, pp. 1–11, 2016.
- [8] J. He, Z. Huang, Y. Li, et al., “Single-channel attention classification algorithm based on robust Kalman filtering and norm-constrained extreme learning machine,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 19, 2025.
- [9] S. Ullah, Y. Shen, X. Su, C. Esposito, and C. Choi, “A localization based on unscented Kalman filter and particle filter localization algorithms,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2233–2246, 2020.
- [10] J. R. Nezdovitz, S. M. Lambert, and R. J. Leigh, “Using natural head movements to continually calibrate EOG signals via sensor fusion methods,” *Journal of Eye Movement Research*, vol. 15, no. 5, pp. 1–13, 2022.
- [11] M. B. Habibie, N. H. Wijaya, and W. K. Wardana, “Analysis of the EOG signal differences based on electrode placement as referred to by the display on Delphi,” *Journal of Medical and Biomedical Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2025.
- [12] J. D. Bronzino, *The Biomedical Engineering Handbook*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000.
- [13] S. Sanei and J. A. Chambers, *EEG Signal Processing*, Chichester, U.K.: Wiley, 2007.
- [14] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1985.
- [15] R. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
- [16] Y. A. K. Utama, A. Budijanto, and A. K. S., “Desain pengendalian koordinat gerak robot nirkabel cerdas menggunakan aplikasi Android melalui akselerasi gerakan smartphone,” *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 10–16, 2018.
- [17] M. S. Ahsan, M. I. Ibrahimy, and O. O. Khalifa, “Electromyography (EMG) signal based hand gesture recognition using artificial neural network,” *Proceedings of the International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, pp. 1–6, 2009.
- [18] S. Ullah and J. Kim, “Human–machine interface using eye gaze estimation: A review,” *Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 1–21, 2020.