

IMPLEMENTASI KALMAN FILTER PADA SISTEM PEMETAAN DENGAN SENSOR ULTRASONIK

Timotius Raphael Calvin Widjaja

Fakultas Teknologi Rekayasa, Program Studi Teknik Elektro

Email: 6152101005@student.unpar.ac.id

Faisal Wahab

Fakultas Teknologi Rekayasa, Program Studi Teknik Elektro

Universitas Katolik Parahyangan

Email: faisal.wahab@unpar.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi yang semakin pesat menuntut manusia untuk terus beradaptasi. Robotika, sebagai salah satu bidang teknologi yang banyak diterapkan, memberikan manfaat dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk pemetaan ruangan. Salah satu teknologi yang digunakan dalam pemetaan adalah sensor ultrasonik, yang menggunakan gelombang suara frekuensi tinggi untuk mendeteksi dan mengukur jarak objek. Gelombang suara yang dipantulkan oleh objek diubah menjadi data jarak atau posisi. Sistem pemetaan ruangan berbasis sensor ultrasonik yang dipasang pada titik pusat putar menghasilkan data sudut rotasi dan jarak pengukuran, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik. Keunggulan sensor ultrasonik meliputi kemampuannya melakukan pemetaan tanpa kontak fisik serta ketahanannya terhadap pengaruh cahaya dan lingkungan, menjadikannya lebih unggul dibandingkan sensor optik. Namun, teknologi ini memiliki kelemahan dalam keakuratan pengukuran akibat fluktuasi sinyal yang disebabkan oleh faktor elektronik dan lingkungan. Untuk mengatasi masalah ini, penerapan Kalman Filter menjadi solusi dalam mereduksi *noise* dan meningkatkan stabilitas data pengukuran. Efektivitas Kalman Filter dalam sistem pemetaan ultrasonik dievaluasi berdasarkan perbandingan antara hasil pengukuran dan jarak ideal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Kalman Filter mampu mengurangi kesalahan pengukuran secara signifikan, sehingga meningkatkan akurasi pemetaan.

Kata kunci: Pemetaan, Ultrasonik, Kalman Filter, Robotika, reduksi noise

ABSTRACT

The rapid advancement of technology requires humans to continuously adapt. Robotics, as one of the widely applied technological fields, provides benefits in various aspects of life, including room mapping. One of the technologies used in mapping is the ultrasonic sensor, which utilizes high-frequency sound waves to detect and measure the distance of objects. The reflected sound waves are converted into distance or position data. A room mapping system based on an ultrasonic sensor mounted on a central rotation point generates rotational angle and distance measurement data, which is then visualized in graphical form. The advantages of ultrasonic sensors include their ability to perform mapping without physical contact and their resistance to light and environmental influences, making them superior to optical sensors. However, this technology has limitations in measurement accuracy due to signal fluctuations caused by electronic and environmental factors. To address this issue, the implementation of the Kalman Filter serves as a solution to reduce noise and improve data stability. The effectiveness of the Kalman Filter in ultrasonic-based mapping systems is evaluated by comparing measurement results with ideal distances. Test results show that the Kalman Filter can significantly reduce measurement errors, thereby enhancing mapping accuracy.

Keywords: Mapping, Ultrasonic, Kalman Filter, Robotics, Noise reduction

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang semakin pesat menuntut manusia sebagai makhluk sosial untuk terus beradaptasi. Salah satu bidang yang mengalami kemajuan signifikan adalah robotika, yang kini banyak diterapkan dalam berbagai aspek kehidupan [1]. Salah satu penerapan penting dalam robotika adalah pemetaan ruangan, yang bertujuan untuk mempermudah proses pemetaan secara otomatis dan meningkatkan efisiensi dalam berbagai aplikasi [2]. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem pemetaan, teknologi ini menjadi semakin krusial dalam berbagai bidang, seperti navigasi kendaraan [3], penghindaran rintangan (*obstacle avoidance*), serta pemetaan bawah air, yang digunakan untuk eksplorasi dan pemantauan lingkungan bawah laut [4]. Selain itu,

sistem pemetaan juga berperan dalam banyak aplikasi lainnya yang mendukung berbagai aspek kehidupan modern [5].

Salah satu sensor yang umum digunakan dalam sistem pemetaan adalah sensor ultrasonik [6]. Teknologi ultrasonik memanfaatkan gelombang suara berfrekuensi tinggi untuk mendeteksi dan mengukur jarak terhadap objek di sekitarnya. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada pemantulan gelombang suara, yang kemudian dikonversi menjadi informasi jarak atau posisi objek yang diukur [7]. Penggunaan sensor ultrasonik dalam pemetaan ruangan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode konvensional. Salah satu keunggulannya adalah kemampuannya melakukan pengukuran tanpa kontak fisik [8]. Selain itu, sistem ini tidak terpengaruh oleh cahaya atau kondisi lingkungan, berbeda dengan metode berbasis sensor optik yang sering mengalami hambatan dalam kondisi pencahayaan rendah atau medan yang kompleks. Keunggulan ini menjadikan teknologi ultrasonik ideal untuk aplikasi robotika, khususnya dalam pemetaan ruangan. Sistem pemetaan ruangan berbasis ultrasonik bekerja dengan mengirimkan gelombang suara dan mengukur waktu tempuh pantulannya. Sensor ultrasonik dipasang pada titik pusat yang dapat berputar, sehingga setiap sudut putar menghasilkan data pengukuran jarak. Data dari sudut putar dan hasil pengukuran ultrasonik kemudian diolah menjadi grafik pemetaan ruangan [9]. Namun, sistem pemetaan berbasis ultrasonik juga memiliki beberapa kelemahan. Salah satunya adalah keterbatasan dalam mendeteksi objek pada bidang yang tidak sesuai, yang dapat menyebabkan penurunan akurasi pengukuran [10][11]. Oleh karena itu, diperlukan teknik filtering untuk meminimalkan kesalahan pengukuran.

Dalam berbagai metode filtering yang tersedia, Kalman Filter menjadi pilihan utama dalam sistem pemetaan ruangan berbasis sensor ultrasonik karena kemampuannya dalam memperkirakan keadaan sistem secara optimal meskipun data pengukuran mengandung noise [12]. Dibandingkan dengan metode sederhana seperti Moving Average Filter [13], Kalman Filter lebih unggul karena tidak hanya menghaluskan data tetapi juga mampu melakukan prediksi berdasarkan model sistem. Selain itu, dibandingkan dengan Median Filter, Kalman Filter lebih efektif dalam menangani noise tanpa menghilangkan informasi penting dari sinyal. Dalam sistem dengan dinamika yang kompleks, Extended Kalman Filter (EKF) [14] atau Unscented Kalman Filter (UKF) [15] dapat digunakan untuk mengatasi non-linearitas, memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan linearisasi sederhana. Oleh karena itu, Kalman Filter menjadi metode yang paling sesuai untuk sistem pemetaan ultrasonik, terutama dalam kondisi lingkungan yang tidak ideal, karena kemampuannya dalam memperbaiki estimasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian dan kesalahan pengukuran [16].

Pada penelitian ini, dibahas implementasi Kalman Filter dalam pengolahan data sensor ultrasonik untuk pemetaan ruangan dalam dua dimensi. Artikel ini terdiri dari beberapa bagian yang terstruktur dengan jelas. Bagian 1 merupakan pendahuluan, yang menjelaskan latar belakang, tujuan, dan ruang lingkup penelitian. Bagian 2 membahas metodologi penelitian, termasuk penerapan Kalman Filter serta perancangan sistem yang digunakan. Bagian 3 menyajikan hasil penelitian dan analisisnya, yang memberikan gambaran mengenai efektivitas metode yang diterapkan. Terakhir, Bagian 4 berisi kesimpulan dari penelitian ini serta saran untuk pengembangan lebih lanjut di masa depan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Kalman Filter

Kalman filter adalah suatu algoritma yang digunakan untuk memprediksi atau mengestimasi keluaran selanjutnya berdasarkan data sebelumnya. Algoritma ini berfungsi untuk mengestimasi keluaran dengan mengurangi *noise* pada sinyal, sehingga hasil estimasi lebih akurat. Dengan demikian, Kalman filter berperan dalam meminimalkan rata-rata error estimasi serta fluktuasi dalam suatu sistem linear, termasuk pada sensor linear [17]. Secara matematis, Kalman filter dapat direpresentasikan melalui persamaan berikut.

$$X'_k = f(x_{k-1}, u_k, 0) \quad (1)$$

$$P'_k = P_{k-1} + Q \quad (2)$$

Persamaan (1), X'_k , merupakan persamaan *initial state* atau kondisi awal. Dalam kasus ini, kondisi awal merupakan pengukuran pertama setelah proses *homing*, di mana $f(x_{k-1})$ adalah fungsi yang akan difilter. Sementara itu, persamaan (2), P'_k , digunakan untuk memprediksi galat kovariansi ke depan. Dalam persamaan ini, variabel Q merepresentasikan kovariansi proses yang digunakan untuk memperbarui kesalahan prediksi. Secara umum, persamaan matematis Kalman filter dapat dinyatakan sebagai berikut.

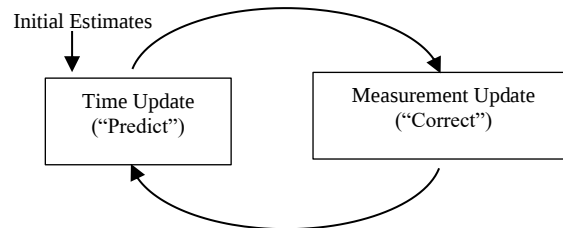
$$K_k = P'_k(P'_k + R)^{-1} \quad (3)$$

$$X_k = X'_k + K_k(z_k - X'_k) \quad (4)$$

$$P_k = (1 - K_k)P'_k \quad (5)$$

Persamaan (3) digunakan untuk menentukan nilai K_k , yang merupakan Kalman Gain. Nilai ini berfungsi untuk memprediksi pengukuran terbaru, yang kemudian digunakan kembali dalam persamaan umum Kalman

filter, seperti pada Persamaan (4). Dalam perhitungan ini, variabel R berperan dalam mengurangi *noise* pada pengukuran, sedangkan z_k merepresentasikan nilai pengukuran aktual pada waktu k . Persamaan (4) digunakan untuk memperoleh nilai prediksi baru berdasarkan input R dan Q yang digunakan. Selain itu, terdapat persamaan untuk memperbarui galat kovariansi, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (5) [18]. Proses perhitungan ini berlangsung secara siklis, di mana variabel perhitungan sebelumnya akan digunakan kembali untuk memprediksi nilai pada waktu mendatang, seperti diilustrasikan pada Gambar 1.

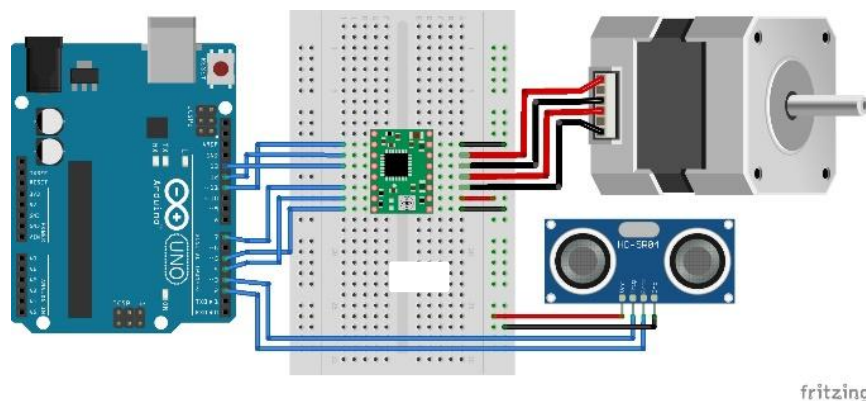


Gambar 1. Diagram Siklus Kalman Filter

Diagram pada Gambar 1 menunjukkan siklus kerja Kalman filter, yang terdiri dari dua tahap utama: *Time Update* ("Predict") dan *Measurement Update* ("Correct"). Pada tahap *Time Update*, sistem melakukan prediksi terhadap keadaan berikutnya berdasarkan model sistem dan estimasi sebelumnya. Prediksi ini mencakup perhitungan *state prediction* dan *covariance prediction*, yang digunakan untuk memperkirakan kondisi masa depan sebelum adanya pengukuran baru. Namun, hasil prediksi ini masih memiliki ketidakpastian, yang kemudian dikoreksi pada tahap *Measurement Update*. Pada tahap ini, sistem menerima pengukuran aktual dari sensor, lalu menggunakan Kalman Gain (K_k) untuk menyesuaikan estimasi dengan mempertimbangkan perbedaan antara prediksi dan pengukuran aktual. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan estimasi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan *noise* dalam pengukuran. Siklus ini berulang secara kontinu, di mana hasil estimasi yang diperbarui akan digunakan kembali untuk prediksi selanjutnya, memungkinkan sistem untuk terus memperbaiki keakuratannya secara dinamis.

3.2 Perancangan Sistem

Sistem pemetaan ruangan ini menggunakan berbagai perangkat elektronik, termasuk sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai pendeteksi jarak untuk akuisisi data, serta microcontroller Arduino Uno Rev3 yang berfungsi sebagai pengolah data dari sensor ultrasonik. Selain itu, motor stepper digunakan sebagai aktuator untuk menggerakkan sumbu putar, sementara Arduino IDE berperan dalam pemrograman sensor, aktuator, dan algoritma pemetaan yang digunakan. Sensor ultrasonik terhubung dengan Arduino untuk menghasilkan data jarak, sedangkan motor stepper yang juga dikendalikan oleh Arduino berfungsi sebagai aktuator sumbu putar bagi sensor ultrasonik. Seluruh komponen ini terintegrasi dalam sistem pemetaan ruangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik Rangkaian Elektrik

Sensor ultrasonik terhubung dengan Arduino melalui pin 2 sebagai Echo (penerima sinyal) dan pin 3 sebagai Trig (pemancar sinyal). Motor stepper dikendalikan menggunakan driver A4988, yang terhubung ke Arduino melalui pin 4 sebagai STEP, pin 5 sebagai DIRE, pin 11 sebagai MicroStep1, pin 12 sebagai MicroStep2, dan pin 13 sebagai MicroStep3. Sensor ultrasonik mendapatkan suplai tegangan DC 5V, sedangkan driver motor stepper A4988 memerlukan tegangan DC 12V. Seluruh perangkat elektronik ini diintegrasikan dalam sistem, dengan sensor ultrasonik dipasang pada sumbu motor stepper untuk memungkinkan pemetaan ruangan secara dinamis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



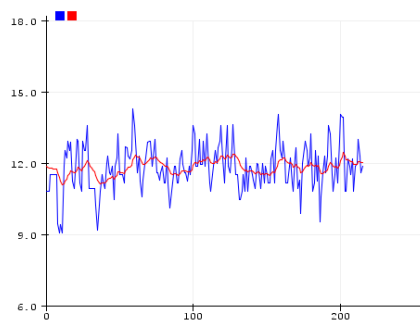
Gambar 3. Perangkat Sistem Pemetaan

Pengimplementasian sistem dilakukan berdasarkan pembacaan data dari sensor ultrasonik dan pergerakan motor stepper. Langkah awal dalam proses ini adalah melakukan *homing*, di mana batas referensi ditentukan menggunakan sensor optocoupler. Setelah *homing*, pengambilan data dilakukan dengan memutar motor stepper dalam interval 0.9 derajat per langkah. Dengan setiap pergerakan sebesar 0.9 derajat atau setengah langkah, sensor ultrasonik melakukan pengukuran jarak. Dalam satu putaran penuh (360 derajat), sistem mengumpulkan 400 data jarak. Perangkat pemetaan ditempatkan di titik pusat sebelum pengambilan data dilakukan. Semua data yang diperoleh, termasuk hasil pengukuran jarak ultrasonik, nilai yang telah difilter menggunakan Kalman Filter, dan sudut rotasi, diolah menjadi data pemetaan. Hasil pemetaan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik radar yang memvisualisasikan hubungan antara sudut terhadap jarak pengukuran dan sudut terhadap hasil Kalman Filter.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Kalman Filter

Sebelum pengujian dilakukan, langkah pertama adalah menentukan time sampling yang optimal untuk memperoleh akurasi yang baik. Dalam penelitian ini, time sampling yang digunakan adalah 150 ms, dengan baud rate sebesar 9600 untuk komunikasi serial. Pengujian dimulai dengan menentukan nilai parameter pada algoritma Kalman Filter, di mana R ditetapkan sebesar 100 dan Q sebesar 1, berdasarkan hasil kalibrasi untuk mengurangi *noise*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pemilihan nilai R dan Q memiliki peran penting dalam meningkatkan akurasi hasil filtering, terutama dalam menstabilkan pengukuran dari sensor ultrasonik yang cenderung bervariasi.

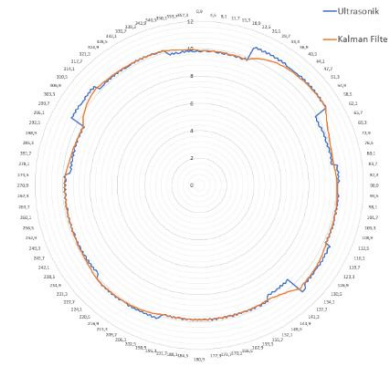


Gambar 4. Hasil Kalibrasi Kalman Filter

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan hasil kalibrasi Kalman Filter terhadap data pengukuran sensor ultrasonik, di mana garis biru merepresentasikan data asli yang berfluktuasi akibat *noise*, sementara garis merah menunjukkan hasil filtering yang lebih halus dan stabil. Dengan menerapkan Kalman Filter, fluktuasi data yang tidak diinginkan dapat dikurangi, sehingga estimasi nilai pengukuran menjadi lebih akurat dan dapat diandalkan untuk pemetaan ruangan menggunakan sensor ultrasonik.

3.2 Pengujian Pemetaan Ruangan

Dalam perancangan sistem, dilakukan dua jenis pengujian untuk pemetaan ruangan, yaitu pemetaan ruangan berbentuk lingkaran dan pemetaan ruangan berbentuk persegi. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam berbagai bentuk lingkungan. Pengujian pemetaan ruangan berbentuk lingkaran dilakukan menggunakan objek berbentuk silinder. Hasil pengujian menghasilkan data dari pengukuran sensor ultrasonik, yang kemudian difilter menggunakan Kalman Filter dan ditampilkan dalam bentuk grafik radar. Hasil pengukuran dan visualisasi grafik untuk pemetaan ruangan berbentuk lingkaran dapat dilihat pada Gambar 5.



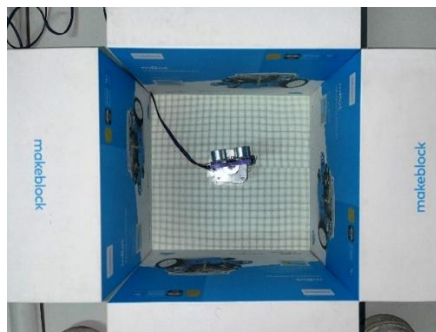
Gambar 5. Hasil Pengujian Sistem Pemetaan Ruang Lingkaran

Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian sistem pemetaan ruangan berbentuk lingkaran menggunakan sensor ultrasonik, yang divisualisasikan dalam grafik radar. Garis biru merepresentasikan data asli dari sensor ultrasonik, yang masih mengandung fluktuasi akibat *noise*, sedangkan garis merah menunjukkan hasil setelah diterapkan Kalman Filter, yang menghasilkan garis lebih halus dan mendekati bentuk lingkaran ideal. Perbandingan antara kedua garis ini menunjukkan bahwa Kalman Filter efektif dalam mengurangi *noise* dan meningkatkan akurasi hasil pemetaan, sehingga sistem dapat lebih andal dalam menentukan batas ruangan dengan bentuk melingkar.

Tabel 1. Hasil Data Pengukuran Ruang Lingkaran

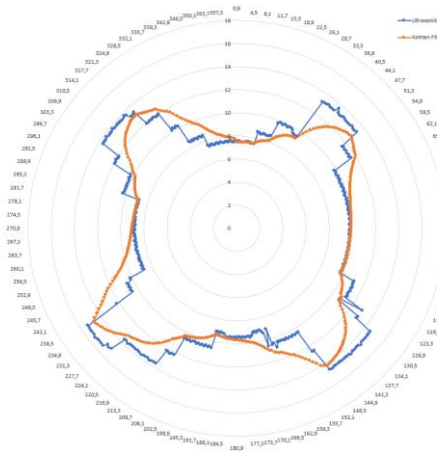
Sudut (Derajat)	Hasil Pengukuran (cm)		Error (%)
	Ultrasonik	Kalman Filter	
0	9.87	9.9	0.2
45	10.82	10.7	0.6
135	10.81	10.515	0.415
225	10.23	10.165	0.065

Tabel 1 menunjukkan hasil data pengukuran ruangan berbentuk lingkaran menggunakan sensor ultrasonik dan Kalman Filter pada beberapa sudut tertentu. Kolom pertama menunjukkan sudut pengukuran dalam derajat, sedangkan kolom kedua dan ketiga berisi hasil pengukuran dalam satuan centimeter (cm) menggunakan sensor ultrasonik dan setelah difilter dengan Kalman Filter. Kolom terakhir menampilkan persentase error antara kedua hasil tersebut. Dari data yang ditampilkan, terlihat bahwa hasil setelah diterapkan Kalman Filter lebih stabil dan mendekati nilai rata-rata, dengan tingkat error relatif kecil, berkisar antara 0.065% hingga 0.6%. Hal ini menunjukkan bahwa Kalman Filter efektif dalam mengurangi fluktuasi data akibat *noise*, sehingga meningkatkan akurasi pengukuran pemetaan ruangan. Nilai error pengukuran ini disebabkan oleh ketidakstabilan pengukuran ultrasonik yang dipengaruhi oleh getaran dari setiap putaran yang dihasilkan oleh motor stepper. Getaran tersebut menyebabkan fluktuasi pada data yang dihasilkan, sehingga hasil pengukuran menjadi kurang akurat.



Gambar 6. Implementasi Sistem Pemetaan Ruang Persegi

Gambar 6 menunjukkan implementasi pengambilan data pada ruangan berbentuk persegi, di mana sensor ultrasonik dan motor stepper digunakan untuk mengukur serta memetakan batas-batas ruangan dengan akurasi tinggi. Hasil dari kedua pengujian ini akan dibandingkan untuk menilai efektivitas sistem dalam menghasilkan peta ruang yang akurat.



Gambar 7. Hasil Pengujian Sistem Pemetaan Ruang Persegi

Gambar 7 menampilkan hasil pemetaan ruangan berbentuk persegi menggunakan sensor ultrasonik dan Kalman Filter dalam bentuk grafik radar. Garis berwarna biru menunjukkan hasil pengukuran langsung dari sensor ultrasonik, yang tampak berfluktuasi akibat *noise* dan ketidakstabilan pengukuran. Sementara itu, garis berwarna oranye merupakan hasil pemrosesan dengan Kalman Filter, yang terlihat lebih halus dan mengikuti bentuk persegi yang lebih akurat dibandingkan garis biru. Hal ini menunjukkan bahwa Kalman Filter berhasil mengurangi gangguan pada data sensor dan meningkatkan ketepatan pemetaan ruangan. Dengan hasil ini, sistem pemetaan dapat lebih andal dalam menggambarkan struktur ruangan secara lebih presisi.

Tabel 2. Hasil Data Pengukuran Ruang Persegi

Sudut (Derajat)	Hasil Pengukuran (cm)		Jarak Aktual (cm)	Error (%)
	Ultrasonik	Kalman Filter		
0	7.44	7.55	7.7	0.15
45	13.6	12.7	12.6	0.1
90	10.1	10.07	9.8	0.27
180	9.45	10.06	9.3	0.76

Tabel 2 menyajikan hasil pengukuran jarak pada ruangan berbentuk persegi menggunakan sensor ultrasonik dan Kalman Filter, yang kemudian dibandingkan dengan jarak aktual untuk menghitung error persentase. Data diambil pada sudut 0°, 45°, 90°, dan 180°. Dari tabel ini terlihat bahwa hasil pengukuran dengan Kalman Filter lebih mendekati jarak aktual dibandingkan dengan hasil sensor ultrasonik tanpa pemrosesan. Misalnya, pada sudut 45°, pengukuran ultrasonik menunjukkan jarak 13.6 cm, sementara hasil Kalman Filter adalah 12.7 cm, yang lebih dekat dengan jarak aktual 12.6 cm. Persentase error tertinggi terjadi pada sudut 180° dengan nilai 0.76%, yang menunjukkan adanya sedikit penyimpangan dalam pemetaan. Secara keseluruhan, penerapan Kalman Filter membantu dalam meningkatkan akurasi pengukuran dengan mengurangi fluktuasi data sensor ultrasonik.

4. KESIMPULAN

Dalam pengujian ini, sistem pemetaan menggunakan sensor ultrasonik dengan penerapan Kalman Filter telah diimplementasikan dalam dua eksperimen. Pengujian berhasil dilakukan dengan akuisisi data dari sensor ultrasonik serta hasil pemrosesan Kalman Filter pada Arduino, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik pemetaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Kalman Filter efektif dalam mereduksi *noise*, sehingga meningkatkan akurasi pemetaan. Berdasarkan analisis data, Kalman Filter terbukti mampu menurunkan nilai error dari hasil pengukuran yang berfluktuasi. Dengan demikian, penerapan Kalman Filter dapat meningkatkan keandalan sistem pemetaan ruangan menggunakan sensor ultrasonik dengan mengurangi kesalahan pengukuran. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sistem dapat ditingkatkan dengan menguji berbagai konfigurasi parameter Kalman Filter untuk menemukan kombinasi R dan Q yang lebih optimal dalam berbagai kondisi lingkungan. Penggunaan metode sensor fusion dengan algoritma lain, seperti *Extended Kalman Filter (EKF)* atau *Particle Filter*, juga dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap *noise* yang lebih kompleks. Lebih lanjut, implementasi pemrosesan data secara real-time menggunakan mikrokontroler yang lebih bertenaga atau komputasi edge dapat mempercepat respons sistem dalam aplikasi pemetaan yang lebih dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Choi et al., "On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions for moving forward," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 1, p. e1907856118, 2021, doi: 10.1073/pnas.1907856118.

-
- [2] J. Duan, "Research on SLAM Mapping for Multi sensor Fusion in Smart Factories," in 2023 2nd International Symposium on Sensor Technology and Control (ISSTC), 2023, pp. 181–186. doi: 10.1109/ISSTC59603.2023.10280998.
- [3] A. A. Ravankar, A. Ravankar, T. Emaru, and Y. Kobayashi, "A hybrid topological mapping and navigation method for large area robot mapping," in 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2017, pp. 1104–1107. doi: 10.23919/SICE.2017.8105770.
- [4] Z. Huang, L. Wan, M. Sheng, J. Zou, and J. Song, "An Underwater Image Enhancement Method for Simultaneous Localization and Mapping of Autonomous Underwater Vehicle," in 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), 2019, pp. 137–142. doi: 10.1109/ICRAS.2019.8809014.
- [5] M. Rivai, D. Hutabarat, and Z. M. Jauhar Nafis, "2D mapping using omni-directional mobile robot equipped with LiDAR," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 3, pp. 1467–1474, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i3.14872.
- [6] I. Abadi and N. El-Sheimy, "Manhattan World Constraint for Indoor Line-based Mapping Using Ultrasonic Scans," in 2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2022, pp. 1–8. doi: 10.1109/IPIN54987.2022.9918099.
- [7] A. Biswas, S. Abedin, and M. A. Kabir, "Moving Object Detection Using Ultrasonic Radar with Proper Distance, Direction, and Object Shape Analysis," *Journal of Information Systems Engineering and Business Intelligence*, vol. 06, pp. 99–111, Jul. 2020, doi: 10.20473/jisebi.6.2.99-111.
- [8] R. Ragavi, A. Ramya, G. Sowndharya, and S. Sunmathy, "Ultrasonic Radar Module Design Using Arduino," *Irish Interdisciplinary Journal of Science & Research*, vol. 07, pp. 65–70, Jul. 2023, doi: 10.46759/IJISR.2023.7408.
- [9] T. Q. Tran, A. Becker, and D. Grzechca, "Environment Mapping Using Sensor Fusion of 2D Laser Scanner and 3D Ultrasonic Sensor for a Real Mobile Robot," *Sensors (Basel)*, vol. 21, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234743482>
- [10] M. Tabatabaeipour et al., "Application of ultrasonic guided waves to robotic occupancy grid mapping," *Mech Syst Signal Process*, vol. 163, p. 108151, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108151.
- [11] Z. Rong, X. Chen, M. Fu, L. Zhou, D. Wu, and L. Zheng, "Research on data filtering method of ultrasonic intelligent water meter based on Kalman filter," in 2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2022, pp. 5146–5151. doi: 10.1109/CCDC55256.2022.10034072.
- [12] E. Surya Aby Nugroho, N. Diana Resty, I. Hudati, and P. Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Fakultas Sekolah Vokasi, "IMPLEMENTASI FILTER KALMAN PADA SENSOR JARAK BERBASIS ULTRASONIK," vol. 2, no. 2, 2021.
- [13] U. M. RIFANTI, H. PUJIHARSONO, A. SETIAWAN, and J. HENDRY, "Implementasi Moving Average Filter untuk Koreksi Kesalahan Sensor Pengukur Kedalaman Air," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 8, no. 2, p. 432, May 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i2.432.
- [14] R. Adhitya, "Penerapan Extended Kalman Filter (EKF) Pada Sistem Monitoring Gelombang Laut Berbasis Sensor IMU GY555," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 10, Mar. 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.3714.
- [15] I. Faruqi, M. Waluya, Y. Nazaruddin, and T. Tamba, "Train Localization using Unscented Kalman Filter – Based Sensor Fusion," *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, vol. 1, pp. 35–41, Mar. 2018, doi: 10.31427/IJSTT.2018.1.2.1.
- [16] X. Quan et al., "An investigation on bolt stress ultrasonic measurement based on acoustic time difference algorithm with adaptive hybrid extended Kalman filter," *Measurement*, vol. 186, p. 110223, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110223>.

- [17] A. Al Tahtawi, "Kalman Filter Algorithm Design for HC-SR04 Ultrasonic Sensor Data Acquisition System," IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering), vol. 2, Jul. 2018, doi: 10.22146/ijitee.36646.
- [18] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter." [Online]. Available: <http://www.cs.unc.edu/~gb>