# Estimasi Gerak Menyelam ITSUNUSA AUV dengan Metode Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR)

**Teguh Herlambang[1], Subchan[2], Hendro Nurhadi[3]**

Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Teknik
Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya, Indonesia[1]
Jurusan Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia[2]
Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia[3]
*e-mail: teguh@unusa.ac.id,* hdnurhadi@me.its.ac.id, subchan@matematika.its.ac.id

***ABSTRACT***

*Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is one type of underwater robot that is relatively flexible for underwater defense system equipment and exploration of natural resources under the sea. AUV consists of translational and rotational movements which are incorporated in the 6 Degree of Freedom (DOF). Control of the AUV is divided into two namely speed control and control to follow the desired trajectory. AUV control to follow the desired trajectory is usually called the navigation system or trajectory estimation. In this research, a navigation system for diving motion with a 3-DOF model was developed, namely surge, heave and pitch motion with the Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) method. Simulation results show that the EnKF-SR method can be used as a 3-DOF navigation system by producing an error estimation of the diving motion for surge, heave and pitch having a fairly small error of 0.02 m / s for translational motion and 0.005 rad / s for rotational motion . While diving position error is only 0.03 meters or 3 cm from the specified track.*

***Keywords:*** *AUV, EnKF-SR, Motion Estimation, Position Estimation*

**ABSTRAK**

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) merupakan salah satu jenis robot bawah air yang relatif flexibel untuk peralatan sistem pertahanan bawah laut dan eksplorasi sumber daya alam di bawah laut. AUV terdiri dari gerak translasi dan rotasi yan tergabung dalam 6 Degree of Freedom (DOF). Pengendalian AUV dibagi menjadi dua yaitu kendali kecepatan dan kendali agar mengikuti lintasan yang diinginkan. Kendali AUV agar mengikuti trajectory yang diinginkan ini biasa disebut dengan system navigasi atau Estimasi trajectory. Pada penelitian ini dikembangkan sistem navigasi untuk gerak menyelam dengan model 3-DOF yaitu gerak surge, heave dan pitch dengan metode Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode EnKF-SR dapat digunakan sebagai sistem system navigasi 3-DOF dengan menghasilkan error estimasi gerak menyelam untuk surge, heave dan pitch memiliki error yang cukup kecil yaitu 0.02 m/s untuk gerak translasi dan 0.005 rad/s untuk gerak rotasi. Sedangkan error posisi menyelam hanya 0.03 meter atau 3 cm dari lintasan yang ditentukan

**Kata kunci:** AUV, EnKF-SR, Estimasi Gerak, Estimasi Posisi

## PENDAHULUAN

Luas perairan di Indonesia lebih luas daripada daratan, sehingga diperlukan teknologi bawah air untuk mengeksplorasi dan menjaga sumber daya alam negara Indonesia diperlukan suatu wahana bawah air [1]. Wahana bawah air yang banyak dikembangkan oleh banyak negara saat ini yaitu robot bawah air tanpa awak atau kapal selam tanpa awak. Robot ini dikenal dengan sebutan Autonomous Underwater Vehicle (AUV). AUV merupakan salah satu jenis robot bawah air yang telah menarik minat banyak penelitian beberapa tahun terakhir [2]. AUV adalah kendaraan yang digerakkan melalui air dengan sistem propulsi, dikendalikan dan dikemudikan

oleh komputer onboard dengan enam derajat kebebasan (DOF) manuver, sehingga dapat melaksanakan tugas yang telah ditentukan sepenuhnya dengan sendirinya. Manfaat AUV tidak hanya mengeksplorasi sumber daya laut, melainkan juga untuk pemetaan bawah laut dan sebagai peralatan sistem pertahanan bawah laut [3,4].

Beberapa penelitian terkait sistem navigasi diantaranya adalah Panish dan Taylor (2011) menggunakan system naigasi pada Bluefin AUV dengan metode Inertial Navigation System (INS) [5]. Selanjutnya Nurhadi dkk (2013) menggunakan metode Ensemble Kalman Filter pada gerak transalasi AUV [6]. Paull dkk (2014) menggunakan metode EKF pada model non-linier 6-DOF dan menggunakan Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [7]. Pada tahun 2015, Ermayanti dkk menggunakan Fuzzy Kalman Filter (FKF) pada Segorogeni AUV [8]. Pada tahun 2017, Herlambang menggunakan metode Ensemble Kalman Filter Square Root untuk etimasi lintasan peluru kendali [9]. Pada tahun 2018, Herlambang dkk menggunakan Particle Swarm Optimization untuk AUV [10].

Diantara metode-metode diatas, terdapat salah satu metode yang dapat digunakan untuk estimasi gerak AUV, adalah metode Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Sehingga pada paper ini menggunakan metode Ensemble Kalman Filter Sqaure Root (EnKF-SR) untuk estimasi gerak menyelam dari persamaan sistem gerak 3-DOF ITSUNUSA AUV.

## TINJAUAN PUSTAKA

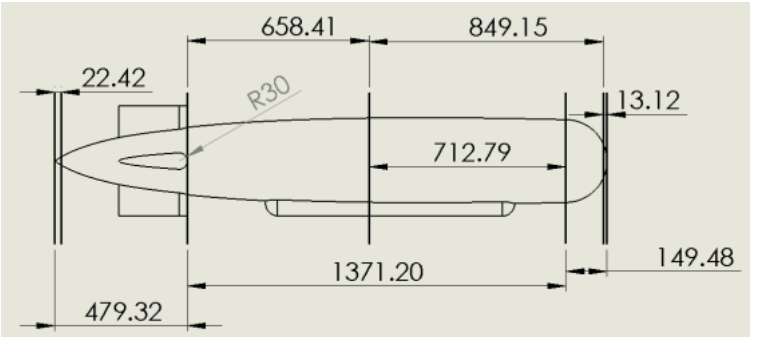
Pada paper ini menggunakan persamaan gerak menyelam dalam 3-DOF yaitu surge, heave dan pitch dengan mengabaikan gerak rotasi yaitu sway, roll dan yaw.pada paper ini menggunakan spesifikasi ITSUNUSA AUV dengan panjang 2 meter, diameter 30 cm dan berat 16 kg [11]. Berikut adalah persamaan gerak AUV dalam 3-DOF:

$$\text{Surge: } \dot{u} = \frac{X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{prop} - m[wq - x_G(q^2) + z_G(q)]}{m - X_{\dot{u}}} \quad .....(1)$$

$$\text{Heave : } \dot{w} = \frac{Z_{res} + Z_{|w|w}w|w| + Z_{q|q|}q|q| + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s - m[-uq - z_G(q^2) + x_G(-q)]}{m - Z_{\dot{w}}} \quad .....(2)$$

$$\text{Pitch : } \dot{q} = \frac{M_{res} + M_{w|w|}w|w| + M_{q|q|}q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{uq}uq + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s - \left(m\begin{bmatrix} z_G(u+wq) \\ x_G(w-uq) \end{bmatrix}\right)}{I_y - M_{\dot{q}}} \quad .....(3)$$

Berikut adalah profil dan spesifikasi dari ITSUNUSA AUV pada Gambar 1.




Gambar 1. Gambar dimensi dari ITSUNUSA AUV.

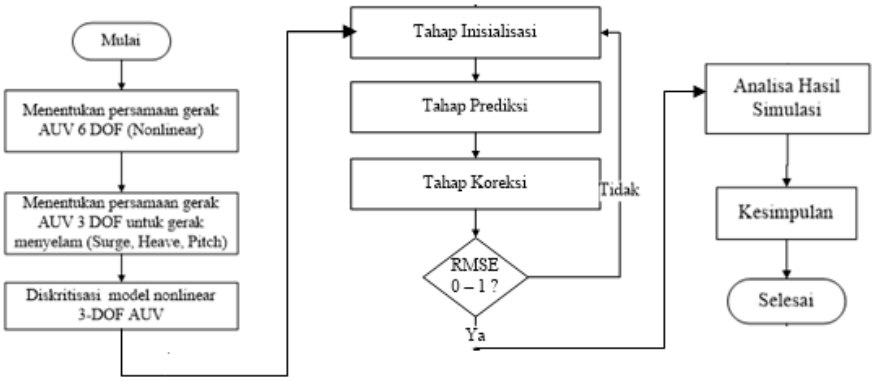
Setelah mendapatkan persamaan sistem gerak 3-DOF AUV, selanjutnya diterapkan algoritma *Ensemble Kalman Filter Square Root* (EnKF-SR) . Berikut adalah algotima *Ensemble Kalman Filter Square Root* (EnKF-SR) pada Tabel 1:

Tabel 1. Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) [9]

| **Model sistem dan Model Pengukuran** |
|---|
| $x_{k+1} = f(u_k, x_k) + w_k, w_k \sim N(0, Q_k)$ |
| $z_k = Hx_k + v_k \ , \ v_k \sim N(0, R_k)$ |
| **Inisialisasi** |
| Bangkitkan $N$ *ensemble* sesuai dengan tebakan awal $\bar{x}_0$ |
| $x_{0,i} = [x_{0,1} \ \ x_{0,2} \ \ x_{0,3} \ \ ... \ \ x_{0,N}]$ |
| Mean *Ensemble* awal : $\bar{x}_{0,i} = x_{0,i} 1_N$ |
| *Ensemble* error awal : $\tilde{x}_{0,i} = x_{0,i} - \bar{x}_{0,i} = x_{0,i}(I - 1_N)$ |
| **Tahap Prediksi** |
| $\hat{x}_{k,i}^- = f(\hat{x}_{k-1,i}, u_{k-1,i}) + w_{k,i}$ dimana $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$ |
| Mean *Ensemble* : $\bar{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^- 1_N$ |
| Error *Ensemble* : $\tilde{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^- - \bar{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^-(I - 1_N)$ |
| **Tahap Koreksi** |
| $z_{k,i} = z_k + v_{k,i}$ dimana $v_{k,i} \sim N(0, R_k)$ |
| $S_k = H\tilde{x}_{k,i}^-$, $E_k = (v_1, v_2, ...., v_N)$, and |
| $C_k = S_k S_k^{\ T} + E_k E_k^{\ T}$ |
| Mean *Ensemble* : $\bar{x}_{k,i} = \bar{x}_{k,i}^- + \tilde{x}_{k,i}^- S_k^{\ T} C_k^{\ -1} \left( \bar{z}_{k,i} - H\bar{x}_{k,i}^- \right)$ |
| Skema Akar kuadrat: |
| - dekomposisi nilai eigen dari $C_k = U_k \Lambda_k U_k^{\ T}$ |
| - menghitung matriks $M_k = \Lambda_k^{\ -1/2} U_k^{\ T} S_k^-$ |
| - menentukan SVD dari $M_k = Y_k L_k V_k^T$ |
| Error *Ensemble* : $\tilde{x}_{k,i} = \tilde{x}_{k,i}^- V_k \left( I - L_k^T L_k \right)^{1/2}$ |
| Estimasi *Ensemble* : $\hat{x}_{k,i} = \tilde{x}_{k,i} + \bar{x}_{k,i}$ |

## METODE

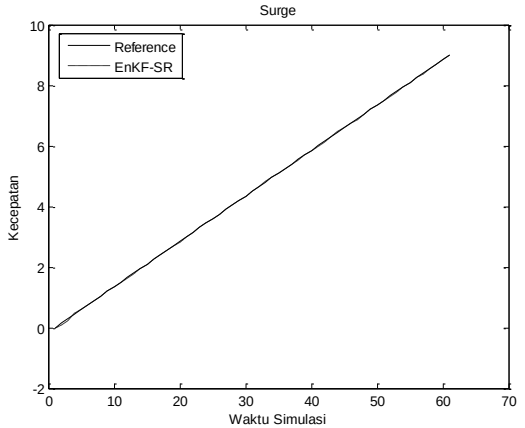
Berikut adalah alur penelitian pada paper ini yang diawali dengan menentukan persamaan gerak 3-DOF dan selanjutnya menerapkan algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root yang tampak pada Gambar 2:




Gambar 2. Alur Penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

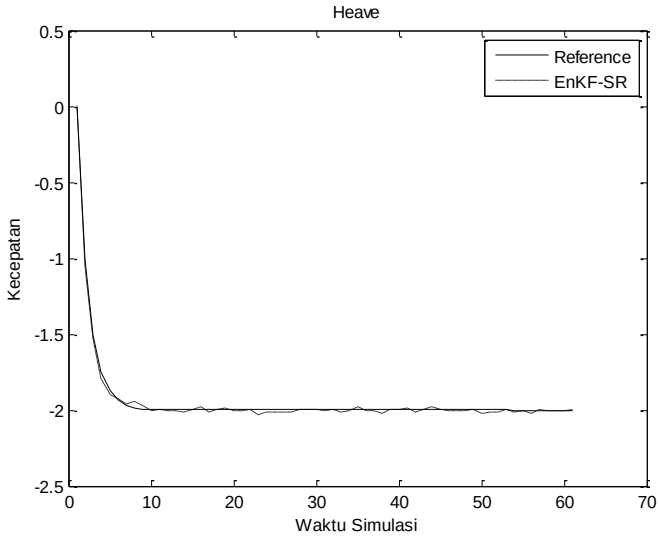
Pada paper ini estimasi gerak menyelam wahana air tanpa awak atau AUV menggunakan metode Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF) dengan membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble. Simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0{,}1$ dan titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $u(0) = 0, w(0) = 0,$ dan $q(0) = 0$. Gambar 3 – 5 adalah hasil simulasi estimasi gerak surge, heave dan pitch pada AUV, dimana gerak surge adalah gerak maju searah dengan sumbu-x dan gerak heave adalah naik dan turun searah dengan sumbu-z dan gerak Pitch adalah gerak rotasi naik dan turun yang searah sumbu-z.



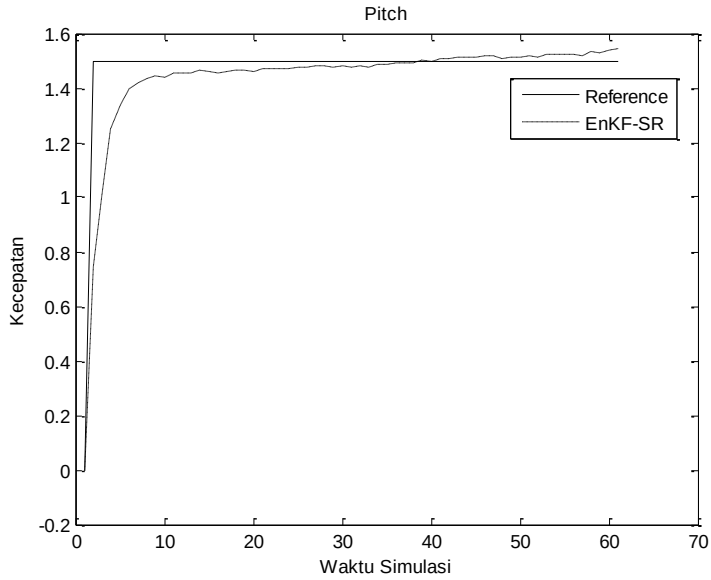

Gambar 3. Estimasi Gerak Surge dengan metode EnKF-SR dan membangkitkan 400 Ensemble

Gambar 3-5 menunjukkan bahwa implementasi metode EnKF pada persamaan gerak menyelam dengan model gerak 3-DOF dengan membangkitkan 400 ensemble memiliki error kecepatan yang cukup kecil, dimana error gerak surge, heave dan pitch memiliki error 0.02 m/s dan 0.005 rad/s dan error posisi menyelam sekitar 0.03 meter. Pada Gambar 3, tampak bahwa estimasi gerak surge memiliki error kecepatan 0.015 m/s dan memiliki keakurasian yang tinggi. Gambar 4 menunjukkan bahwa error yang dihasilkan pada gerak heave cukup kecil meskipun ada sedikit jarak dengan referencenya dengan error kecepatan 0.012 m/s. Gambar 5 merepresentasikan hasil estimasi gerak Pitch yang memiliki error yang cukup kecil yaitu 0.004

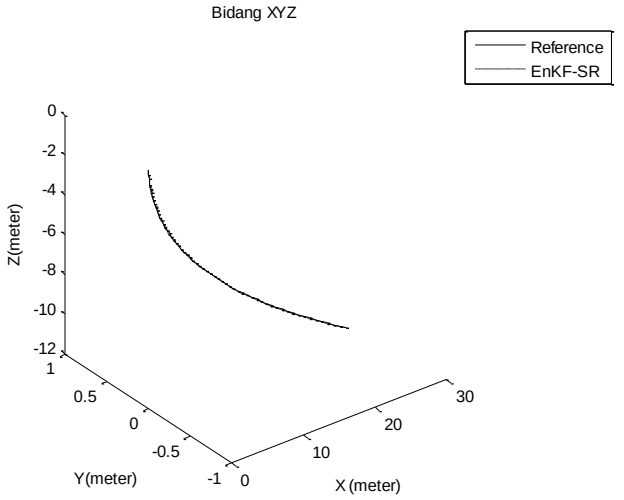
rad/s. Namun pada Gambar 6 ditinjau dari hasil estimasi posisi menyelam, terlihat bahwa error posisi sangat kecil sekitar 0.03 meter atau 3 cm dari 20 meter atau sekitar 0.0015 %.




Gambar 4. Estimasi Gerak Heave dengan metode EnKF-SR dan membangkitkan 400 Ensemble




Gambar 5. Estimasi Gerak Pitch dengan metode EnKF-SR dan membangkitkan 400 Ensemble




Gambar 6. Estimasi Posisi Menyelam dengan metode EnKF-SR dan membangkitkan 400 Ensemble

Selanjutnya perbandingan hasil estimasi dengan membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble pada Tabel 2 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 400 ensemble memiliki error yang lebih kecil daripada 200 dan 300 ensemble. Jka ditinjau dari waktu simulasi bahwa terlihat dengan membangkitkan 400 ensemble memiliki waktu lebih lambat daripada 200 dan 300 ensemble karena jumlah ensemble sangat berpengaruh di waktu simulasi.

Dari hasil analisa pada simulasi dengan membangkitkan 200,300 dan 400 ensemble didapatkan memiliki error kecepatan yang kurang dari 3%, sedangkan untuk error posisi kurang dari 2% sehingga metode EnKF-SR dapat digunakan sebagai salah satu metode estimasi kecepatan gerak dan estimasi gerak menyelam pada Autonomous Underwater Vehicle (AUV).

Tabel 2. Perbandingan Nilai RMSE Hasil Simulasi

| | Berdasarkan Jumlah Ensemble | | |
|---|---|---|---|
| | 200 | 300 | 400 |
| Surge | 0.02568 m/s | 0.02079 m/s | 0.01582 m/s |
| Heave | 0.02344 m/s | 0.01872 m/s | 0.01269 m/s |
| Pitch | 0.00539 rad/s | 0.00465 rad /s | 0.00415 rad /s |
| Posisi Menyelam | 0.03541 m | 0.02875 m | 0.01938 m |
| Time Simulation | 4.632 s | 6.281 s | 7.1569 s |

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa tentang hasil simulasi metode Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) pada model gerak menyelam 3-DOF pada AUV, didapatkan bahwa estimasi gerak menyelam untuk surge, heave dan pitch memiliki error yang cukup kecil yaitu 0.02 m/s untuk gerak translasi dan 0.005 rad/s untuk gerak rotasi. Sedangkan error posisi menyelam hanya 0.03 meter atau 3 cm dari lintasan yang ditentukan. Sehingga metode EnKF-SR dapat digunakan sebagai estimator dari gerak menyelam Autonomous Underwater Vehicle (AUV).

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan Terima Kasih Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi (Kemenristekdikti) yang telah mendukung penelitian penulis pada tahun 2019 dengan nomer kontrak 061/SP2H/LT/MONO/L7/2019 dan 947/PKS/ITS/2019. Peneliti juga mengucapkan Terima Kasih kepada Pusat Unggulan Mechatronics Indutri Automation (PUI-MIA-RC ITS) dan Laboratorium Robotika ITS.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] Control Systems for ITS AUV, Applied Mechanics and Materials Vol. 493 (2014) pp 420-425 Trans Tech Publications, Switzerland. 2014.

[2] Oktafianto, K., Herlambang T., Mardlijah, Nurhadi H., 2015, "Design of Autonomous Underwater Vehcle Motion Control Using Sliding Mode Control Method", *International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*-IEEE Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015.

[3] Herlambang, T., Subchan and Nurhadi H., 2018, "Design of Motion Control Using Proportional Integral Derivative for UNUSAITS AUV", *International Review of Mechanical Engineering* IREME Journal, Vol. 12, No. 11. Pp. 928-938, ISSN 1970 – 8734. *Nov*

[4] Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015, "Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling", *Proc. of International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation,* IEEE , ICAMIMIA 2015,Surabaya, Indonesia, pp. 184-187, Oct 15 – 17.

[5] Panish, R. and Taylor, M., 2011, "Achieving High Navigation Accuracy Using Inertial Navigation Systems in Autonomous Underwater Vehicle". *Proc. of OCEANS 2011*, IEEE, Santander, Spanyol, June. 6-9

[6] Nurhadi, H., Subchan, and Gustiyadi, F.R., 2012, "Design of Position Estimation Algorithm of Navigation and Trajectory System for Unmanned Underwater Vehicle ITS AUV-01 using Ensemble Kalman Filter (EnKF) Method", *13th Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (SITIA 2012),* Surabaya, Indonesia, May 23

[7] Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., and Li, H., 2014, "AUV Navigation and Localization: A Review", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 39, No 1, Jan.

[8] Ermayanti, E., Aprilini, E., Nurhadi H, and Herlambang T, 2015, "Estimate and Control Position Autonomous Underwater Vehicle Based on Determined Trajectory using Fuzzy Kalman Filter Method", *International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*-IEEESurabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015

[9] Herlambang, T., 2017, "Design of a Navigation and Guidance System of Missile with Trajectory Estimation Using Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT)-IEEE, Bali Indonesia 8-10 Augsut 2017.

[10] Herlambang, T., Rahmalia, D., and Yulianto, T., 2018," Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) for Optimizing PID Parameters on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Control System", The Second Internatonal Conference on Combinatorics, Graph Teory and Network Topology, University of Jember-Indonesia, 24-25 Nov 2018

[11] Herlambang, T., Subchan and Nurhadi H., 2018, "Position Estimation of ITSUNUSA AUV Based on Determined Trajectory using Kalman Filter (KF)", International Conference on Research, Implementation and Education of Mathematics and Science (ICRIEMS), Yogjakarta, 7-8 May 2018

*ISSN (print): 2686-0023*
*ISSN (online): 2685-6875*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*