

DESAIN SISTEM KENDALI GERAK SURGE DAN ROLL PADA SISTEM AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE DENGAN METODE SLIDING MODE CONTROL (SMC)

Teguh Herlambang, Hendro Nurhadi

Program Studi Sistem Informasi Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya (UNUSA)
Program Studi D3 Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
teguh@unusa.ac.id, hdnurhadi@me.its.ac.id

ABSTRAK

Pada paper ini dilakukan desain sistem kendali gerak pada persamaan gerak 2-DOF pada sistem Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Persamaan gerak 2-DOF yang terdiri dari gerak surge dan roll dalam bentuk persamaan gerak nonlinier. Desain kendali sistem yang diterapkan pada sistem UNUSAITS AUV menggunakan metode Sliding Mode Control (SMC). Hasil simulasi sistem kendali SMC dengan persamaan gerak 2-DOF pada sistem UNUSAITS AUV menunjukkan bahwa sistem stabil pada nilai setpoint yang telah ditentukan dengan error pada gerak surge 0.01% dan gerak roll 0.042%.

Kata Kunci: AUV, Kendali gerak, Sliding Mode Control

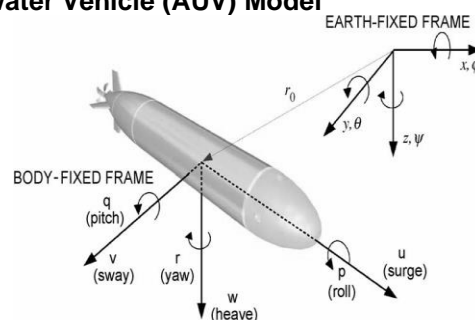
1. Pendahuluan

Teknologi pada bidang wahana bawah air memiliki peranan yang sangat penting bagi negara Indonesia, karena 70% wilayahnya adalah lautan. Karena luas perairan di Indonesia lebih luas daripada daratan maka diperlukan teknologi bawah air untuk mengeksplorasi dan menjaga sumber daya alam negara Indonesia diperlukan suatu wahana bawah air.

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) yang merupakan salah satu bagian dari wahana tanpa awak atau Unmanned Vehicle yang bekerja secara otomatis tanpa adanya kendali langsung oleh manusia. Manfaat AUV tidak hanya mengeksplorasi sumber daya laut, melainkan juga untuk pemetaan bawah laut dan sebagai peralatan sistem pertahanan bawah laut (Herlambang, 2015).

Pada paper ini diawali dengan penyusunan model persamaan gerak 2-DOF yaitu gerak surge dan roll. Gerak surge dan roll merupakan gerak translasi dan rotasi pada sumbu-x, selanjutnya dikembangkan desain sistem kendali gerak untuk gerakan maju dengan menggunakan Sliding Mode Control (SMC). Berikutnya dapat diketahui kestabilan dan error dan *settling time* yang dihasilkan dari metode SMC dengan menganalisa hasil simulasi dengan nilai setpoint yang ditentukan.

2. Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Model



Gambar 1. Enam derajat kebebasan gerak AUV (Yang, 2007)

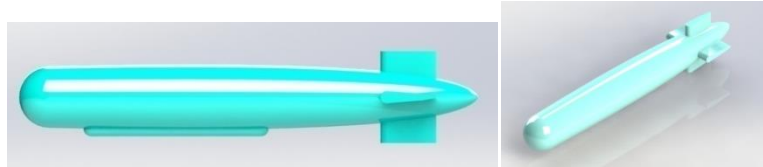
Untuk menganalisa sistem AUV terdapat dua hal penting yang diperlukan, yaitu sistem sumbu yang terdiri dari *Earth Fixed Frame* (EFF) dan *Body Fixed Frame* (BFF) yang telah direpresentasikan pada Gambar 1 (Yang, 2007). EFF digunakan untuk menjelaskan posisi dan orientasi dari AUV, di mana posisi sumbu- x mengarah ke arah utara, sumbu- y ke arah timur dan sumbu- z ke arah pusat bumi. Sedangkan BFF mendefinisikan sumbu- x positif mengarah ke haluan wahana, sumbu- y positif mengarah ke sisi kanan wahana, dan sumbu- z positif mengarah

ke bawah (Fosen, 2005). Sistem BFF digunakan untuk menjelaskan kecepatan dan percepatan dari AUV dengan titik mula berada pada pusat gravitasi. Pada paper ini menggunakan persamaan gerak dalam 2-DOF yaitu surge dan roll dengan mengabaikan gerak syway, heave, pitch dan yaw. Berikut adalah persamaan gerak dalam 2-DOF:

$$\dot{u} = \frac{X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{prop}}{m - X_{\dot{u}}} \quad (1)$$

$$\dot{p} = \frac{K_{res} + K_{|p|p}|p| + K_{prop}}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (2)$$

Dimana X_{res} dan K_{res} merupakan gaya dan momen hidrostatis pada arah sumbu-x, X_{prop} dan K_{prop} sebagai gaya dan momen dorong. Profil dan spesifikasi UNUSAITS AUV terdapat pada Gambar 2 dan Tabel 1.



Gambar 2. Profil UNUSAITS AUV (Herlambang dkk, 2016)

Tabel 1. Spesifikasi dari UNUSAITS AUV (Herlambang dkk, 2016)

Berat	16 Kg
Panjang	1500 mm
Diameter	200 mm
Controller	Ardupilot Mega 2.0
Komunikasi	Wireless Xbee 2.4 GHz
Camera	TTL Camera
Battery	Li-Pro 11,8 V
Propulsion	12V motor DC
Propeller	3 Blades OD : 50 mm
Speed	3.1 knots (1.5m/s)
Kedalaman Maksimum	8 m

3. Sliding Mode Control (SMC)

Rancangan suatu pengendali SMC dapat diuraikan sebagai berikut (Herlambang dkk,2011):

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(x,t)$ seperti pada persamaan $S(x,t) = \dot{e} + \lambda e = 0$ dari *tracking error* sistem dinamik.
2. Menentukan permukaan *Sliding*, yaitu $S(x,t)=0$ dari fungsi *Switching* yang telah diperoleh.
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} . Dinamika saat dalam kondisi *sliding* dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{S} = 0$$

dengan menyelesaikan fungsi switching diperoleh ekspresi untuk nilai estimasi pengendali \hat{u} sebagai kontrol ekivalen. Pada waktu menggunakan SMC dinamis pada saat $\dot{S} = 0$ ditemukan \hat{u}

4. Mendefinisikan aturan SMC, yaitu penggunaan *control law*,

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S)$$

di mana fungsi signum, sgn didefinisikan sebagai:

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & , x < 0 \\ 1 & , x \geq 0 \end{cases}$$

5. Substitusi nilai \hat{u} pada *control law* sehingga diperoleh *control input* baru sebagai pengganti *control input* sebelumnya.
6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding* pada persamaan tahap 4.

Selanjutnya adalah merancang sistem kendali SMC pada persamaan gerak model nonlinier 2-DOF.

4. Perancangan Sistem Kendali SMC pada model nonlinier 2-DOF

Pada bagian ini dirancang sistem kendali SMC untuk mendapatkan control input pada gerak surge dan roll

4.1 Sistem Kendali Surge

Untuk mencari kontrol dari surge terlebih dahulu ditentukan tracking error dari surge sebagai berikut

$$\tilde{u} = u - u_d \quad u_d = \text{konstan}$$

Karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(u, t) = \left(\frac{d}{dt}\right)^{n-1} \tilde{u} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(u, t) = \left(\frac{d}{dt}\right)^{1-1} \tilde{u}$$

$$S(u, t) = \tilde{u} = u - u_d$$

Sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(u, t) = \dot{u} - \dot{u}_d \quad (3)$$

Karena $u_d = \text{konstan}$ maka $\dot{u}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan persamaan (1) ke (3), menjadi :

$$\dot{S}(u, t) = \frac{X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{prop}}{m - X_{\dot{u}}} \quad (4)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{X}_{prop} dari persamaan (4) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\frac{X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{prop}}{m - X_{\dot{u}}} = 0 \quad (5)$$

Sehingga didapat \hat{X}_{prop} adalah

$$\hat{X}_{prop} = -(X_{res} + X_{|u|u}|u|) \quad (6)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K_1 \text{sgn}(S) \quad (7)$$

Maka dari persamaan (6) dan (7) diperoleh :

$$X_{prop} = -(X_{res} + X_{|u|u}|u|) - K_1 \text{sgn}(S) \quad (8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke (5), diperoleh :

$$\dot{S}(u, t) = \frac{X_{res} + X_{|u|u}|u| + (-X_{res} + X_{|u|u}|u|) - K_1 \text{sgn}(S)}{m - X_{\dot{u}}}$$

$$\dot{S}(u, t) = -\frac{K_1 \text{sgn}(S)}{m - X_{\dot{u}}} \quad (9)$$

Kemudian akan dirancang nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (9) ke dalam persamaan (10) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (10)$$

$$-S \frac{K_1 \text{sgn}(S)}{m - X_{\dot{u}}} \leq -\eta|S|$$

$$-AA_1 K_1 \text{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_1 \geq \frac{(m - X_{\dot{u}})\eta}{\text{sgn}(S)} \quad (11)$$

Dari persamaan (11) diperoleh bahwa nilai K adalah :

$$K_1 = |\max(m - X_{\dot{u}})\eta| \quad (12)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (13)$$

Dengan demikian rancangan pengendali yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (6) dan (12) ke persamaan (13) adalah sebagai berikut :

$$X_{prop} = -(X_{res} + X_{|u|u}|u|) - |\max(m - X_{\dot{u}})\eta| \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (14)$$

4.2 Sistem Kendali Roll

Untuk mencari kontrol dari roll terlebih dahulu ditentukan tracking error dari roll sebagai berikut

$$\tilde{p} = p - p_d \quad p_d = \text{konstan}$$

Karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(p, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{p} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(p, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{p}$$

$$S(p, t) = \tilde{p} = p - p_d$$

Sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(p, t) = \dot{p} - \dot{p}_d \quad (15)$$

Karena $p_d = \text{konstan}$ maka $\dot{p}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) ke (15), menjadi :

$$\dot{S}(p, t) = \frac{K_{res} + K_p |p| |p| + K_{prop}}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (16)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{K}_{prop} dari persamaan (16) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\frac{K_{res} + K_p |p| |p| + K_{prop}}{I_x - K_{\dot{p}}} = 0 \quad (17)$$

Sehingga didapat \hat{K}_{prop} adalah

$$\hat{K}_{prop} = -(K_{res} + K_p |p| |p|) \quad (18)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$K_{prop} = \hat{K}_{prop} - K \text{sgn}(S) \quad (19)$$

Maka dari persamaan (18) dan (19) diperoleh :

$$K_{prop} = -(K_{res} + K_p |p| |p|) - K \text{sgn}(S) \quad (20)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (20) ke (16), diperoleh :

$$\dot{S}(p, t) = \frac{K_{res} + K_p |p| |p| + (- (K_{res} + K_p |p| |p|) - K \text{sgn}(S))}{I_x - K_{\dot{p}}}$$

$$\dot{S}(p, t) = - \frac{K \text{sgn}(S)}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (21)$$

Kemudian akan dirancang nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (21) ke dalam persamaan (22) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (22)$$

$$-S \frac{K \text{sgn}(S)}{I_x - K_{\dot{p}}} \leq -\eta|S|$$

$$K \geq \frac{(I_x - K_{\dot{p}})\eta}{\text{sgn}(S)} \quad (23)$$

Dari persamaan (23) diperoleh bahwa nilai K adalah :

$$K = |\max(I_x - K_p)\eta| \quad (24)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

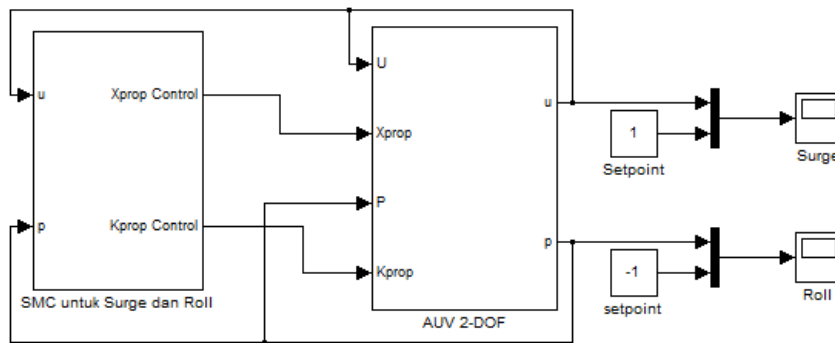
$$K_{prop} = \hat{K}_{prop} - K \text{ sat} \left(\frac{s}{\phi} \right) \quad (25)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (18) dan (24) ke persamaan (25) adalah sebagai berikut :

$$K_{prop} = -(K_{res} + K_p|p|p) - |\max(I_x - K_p)\eta| \text{ sat} \left(\frac{s}{\phi} \right) \quad (26)$$

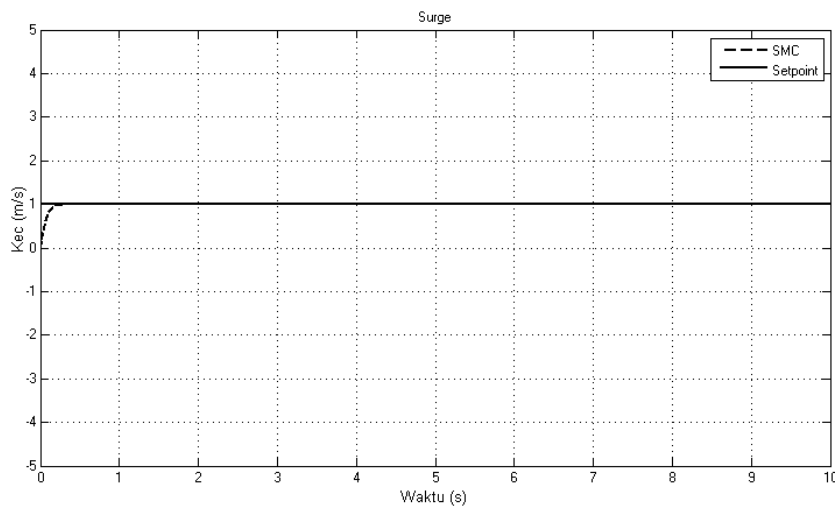
5. Hasil Simulasi dan Analisa

Setelah rancangan sistem kendali SMC pada model nonlinear 2-DOF diperoleh, selanjutnya disimulasikan pada simulink Matlab. Sistem pengendali ini dirangkai pada blok diagram dengan AUV berupa lup tertutup yang tampak pada Gambar 3.

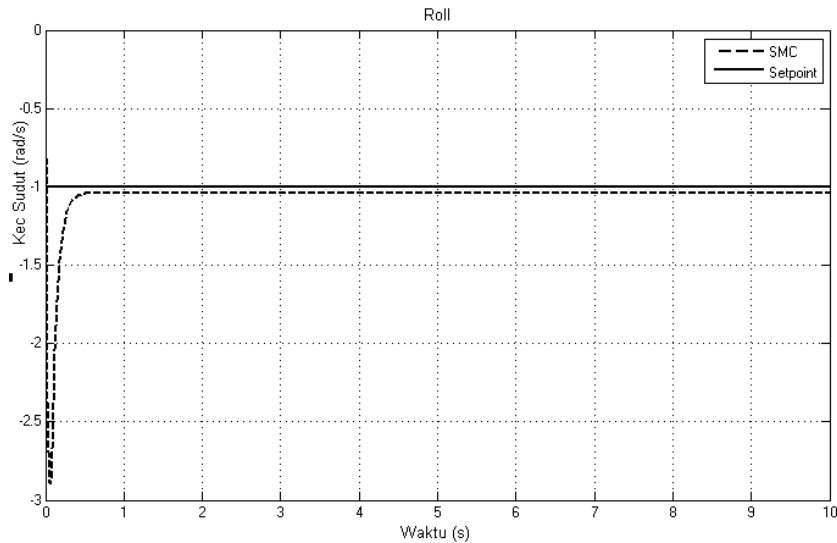


Gambar 3 Blok Diagram AUV model nonlinear 2-DOF dengan Sistem Kendali SMC

Setelah sistem kendali SMC dan AUV disimulasikan maka menghasilkan respon untuk gerak translasi dan rotasi yang tampak pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Respon Gerak Surge dengan Sistem Kendali SMC



Gambar 5. Respon Gerak Roll dengan Sistem Kendali SMC

Pada Gambar 4 merupakan hasil respon SMC untuk gerak surge. Tampak bahwa respon gerak surge stabil pada setpoint 1 m/s dan dapat mencapai *settling time* 0.3 sekon dan memiliki error 0.01%. Sedangkan pada Gambar 5 merepresentasikan hasil respon SMC untuk gerak roll. Terlihat bahwa respon gerak roll pada setpoint 1 rad/s dan dapat mencapai *settling time* 0.5 sekon dan memiliki error 0.042% serta mencapai maksimum *overshoot* -2.8 rad/s.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa metode Sliding Mode Control (SMC) dapat diterapkan sebagai sistem kendali gerak surge dan roll dengan menghasilkan error gerak surge 0.01% dengan *settling time* 0.3 sekon dan error gerak roll 0.042% dengan *settling time* 0.5 sekon.

7. Daftar Pustaka

- Fossen, T. I. 2005, "A Nonlinear Unified State-space Model for Ship Maneuvering and Control in A Seaway". *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 5, pp. 2717-2746, Aug
- Herlambang, T., Apriliani E, Cordova H, Mardijah., 2011, "Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem *Steam Drum Boiler* dengan menggunakan Sliding Mode Control (SMC)", *Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA Universitas Negeri Yogyakarta*, Yogyakarta, 14 Mei 2011.
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015a "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.
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015b, "Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS", *International Review of Mechanical Engineering IREME Journal*, Vol. 9, No. 6. Pp. 553-560, ISSN 1970 – 8734. Nov.
- Herlambang, T., Nurhadi H, and Djatmiko E.B., 2016, "Optimasi Model Linier 6-DOF pada Sistem Autonomous Underwater Vehicle", *Seminar Nasional Maritim, Sain dan Teknologi Terapan (MASTER) PPNS Surabaya Indonesia*, 21 November 2016.
- Yang, C. 2007. *Modular Modelling and Control for Autonomous Vehicle (AUV)*. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore.