

DESAIN KENDALI HALUAN BERBASIS ULTRASONIK MULTI-SUDUT UNTUK PROTOTIPE KAPAL TANPA AWAK

DESIGN OF AN ULTRASONIC MULTI-ANGLE BOW CONTROL SYSTEM FOR AN UNMANNED SURFACE VESSEL PROTOTYPE

Muhammad Ikhsan^{1*}, Dedi Kurniawan², Muhammad Yani², Muhammad Aziz²

¹Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh, Indonesia

²Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

*email: m.ikhsan@ar-raniry.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang sistem kendali haluan kontinu yang hemat sumber daya menggunakan konfigurasi spasial simetris lima sensor ultrasonik yakni depan 0°, kiri 22.5°, kiri 45°, Kanan 22.5°, dan Kanan 45°. Penambahan sudut antara 22.5° diimplementasikan untuk mengeliminasi titik buta (*blind spot*) pada haluan. Integrasi pemodelan waktu kritis menyesuaikan dengan Model Kemudi Nomoto Orde Pertama. Persamaan yang digunakan mampu menghasilkan instruksi sudut kemudi yang berbanding terbalik terhadap sisa jarak aman rintangan tanpa memerlukan *threshold* statis. Hasil simulasi dan pengujian skenario menunjukkan bahwa pada kondisi aman, kemudi bergerak melandai secara normal, sementara pada kondisi kritis sebagian sisi lambung kapal sistem melakukan pembatasan (*clamping*) sudut pada 60°. Ketika menghadapi skenario blokade total sistem mengaktifkan mode mitigasi darurat dengan memutus fungsi kontinu, menurunkan motor ke level minimal untuk mereduksi inersia, dan mengunci kemudi pada sudut 60° kanan guna melakukan manuver poros (*pivot turn*). Kontribusi teoretis dari penelitian ini adalah hilangnya parameter kecepatan v dan waktu kritis dari persamaan final. System kendali ini tetap adaptif terhadap variasi kecepatan jelajah memanfaatkan fenomena kompensasi hidrodinamika alami lambung kapal, sehingga membebaskan mikrokontroler dari kebutuhan sensor kecepatan tambahan serta menghemat beban komputasi.

Kata kunci: *Autonomous Surface Vehicle* (ASV), Penghindar Rintangan Kontinu, Konfigurasi Multi-Sensor, Model Nomoto, Kompensasi Hidrodinamika.

ABSTRACT

This study aims to design a resource-efficient, continuous heading control system employing a symmetrical spatial configuration of five ultrasonic sensors positioned at 0° (front), 22.5°, and 45° (left/right). The incorporation of the 22.5° intermediate angles is implemented to eliminate blind spots across the bow area. By integrating critical time-to-collision modeling with the First-Order Nomoto Steering Model, the proposed equation generates instantaneous rudder angle commands that are inversely proportional to the remaining clearance distance from obstacles, thereby eliminating the need for static thresholds. Simulation results and scenario testing demonstrate that under safe navigation conditions, the rudder executes smooth, standard movements. Conversely, under critical conditions affecting a portion of the hull sides, the system applies angle clamping at 60°. When encountering a total blockade scenario, the system activates an emergency mitigation mode that bypasses the continuous function, reduces the propulsion motor to its minimal level to diminish forward inertia, and locks the rudder at a 60° right deflection to execute a pivot turn. The primary theoretical contribution of this research is the elimination of both the velocity parameter v and the critical time variable from the final governing equation. This control architecture remains inherently adaptive to cruise speed variations by leveraging the natural hydrodynamic compensation of the ship's hull, consequently exempting the microcontroller from requiring supplementary speed sensors and significantly reducing the overall computational load.

Keywords: *Autonomous Surface Vehicle (ASV), Continuous Obstacle Avoidance, Multi-Sensor Configuration, Nomoto Model, Hydrodynamic Compensation.*

1. Pendahuluan

Keandalan sistem deteksi rintangan merupakan pilar utama dalam cetak biru pengembangan kapal tanpa awak (*Autonomous Surface Vehicle*). Pengembangan kapal tanpa awak (*Autonomous Surface Vehicle* atau ASV) untuk keperluan pemantauan kualitas air, pemetaan sungai, maupun misi penyelamatan air dangkal membutuhkan sistem penghindar rintangan yang tanggap namun efisien dari segi biaya dan daya.

Sejauh ini, pilihan sensor navigasi acap kali jatuh pada dua kutub ekstrim, sistem tingkat tinggi menggunakan LiDAR 3D atau kamera stereo dipadu modul Image Processing (Chang et al, 2021; Zube et al, 2022; Saptoe et al, 2025). Pendekatan ini sangat akurat, namun menguras daya baterai (Raj et al, 2020), menambah bobot kapal, dan membutuhkan mikroprosesor berharga tinggi (Mendez et al, 2024). Pada sistem sederhana, digunakan sensor jarak ultrasonik atau infra merah murah, namun logika pergerakannya masih bergantung pada logika sakelar *if-else*.

Kelemahan utama dari sistem sederhana berbasis batas ambang statis ini adalah timbulnya efek *chattering* yaitu kondisi ketika kapal berbelok secara mendadak dengan sudut patah saat mendekati objek. Dalam dinamika fluida, gerakan kemudi yang mendadak justru memperbesar hambatan air (*drag*) dan memperburuk stabilitas haluan kapal (Hosseinzadeh et al, 2025).

Untuk menjembatani celah tersebut, penelitian ini merancang sistem kendali haluan yang tetap hemat sumber daya namun memiliki respon yang halus dan kontinu. Kami menggunakan susunan lima sensor ultrasonik yang ditempatkan melingkar di bagian depan moncong (bow) kapal.

Perbedaan utama dari penelitian sebelumnya terletak pada formulasi respon kemudi dimana Tidak Ada *threshold statis* (Zhang et al, 2024). Besar kecilnya sudut kemudi berubah secara proporsional berbalik nilai terhadap sisa jarak aman kapal terhadap rintangan. Semakin dekat rintangan dengan batas buffer minimum, semakin tajam koreksi haluan yang dihasilkan. Selain itu formula pembelokan turut memperhitungkan parameter fisik panjang lambung kapal dan respon hidrodinamika air, sehingga model ini realistis jika diterapkan pada berbagai ukuran fisik prototipe kapal.

Apabila kelima sensor mendeteksi halangan secara serentak (misalnya ketika memasuki sudut

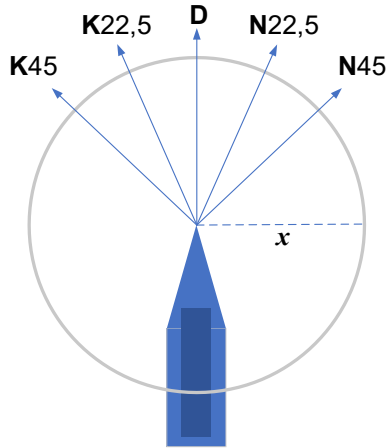
mati atau lorong sempit), sistem akan menurunkan laju dorong (*throttle*) dan mengambil manuver belok kanan 60° untuk membebaskan haluan.

Tantangan terbesar pada perancangan skala prototipe adalah keterbatasan sudut pandang (*blind spot*) jika hanya menggunakan konfigurasi sensor tunggal. Oleh karena itu, diperlukan sebuah desain konfigurasi multi-sensor yang mampu memetakan area haluan secara menyeluruh tanpa membebani komputasi mikrokontroler. Penelitian ini mengajukan desain susunan 5 sensor ultrasonik yang dipasang di area depan kapal dengan cakupan sudut horizontal terdistribusi secara simetris, yaitu: Depan 0°, Kiri 22.5°, Kiri 45°, Kanan 22.5°, dan Kanan 45°. Penambahan sudut intermediate 22.5° bertujuan untuk memberikan resolusi yang lebih rapat sebelum kapal mengambil keputusan untuk membelok ekstrem pada sudut 45°. Berbeda dengan sistem kendali kontinu yang memerlukan waktu komputasi kalkulus, penelitian ini berfokus pada desain algoritma kendali logika diskrit berjenjang. Desain ini dirancang untuk memberikan instruksi kemudi (*rudder*) yang instan secara bertahap berdasarkan pemetaan matriks kondisi sensor, serta menyediakan prosedur mitigasi teoritis ketika seluruh area haluan kapal tertutup oleh rintangan.

2. Metode Penelitian

2.1 Konfigurasi Geometri Sensor

Lima sensor ultrasonik dipasang pada ujung depan kapal. Variabel pembacaan jarak dari masing-masing sensor diberi notasi d_i , dengan i mewakili arah sensor D untuk depan, K22.5 dan K45 untuk sisi kiri, serta N22.5 dan N45 untuk sisi kanan. Jarak aman paling dekat yang dapat ditoleransi oleh lambung kapal ditentukan sebesar x meter. Konfigurasi sensor dapat dilihat seperti Gambar 1.



Gambar 1. Tampak atas Konfigurasi Geometri Sensor pada Kapal

2.2 Model Matematika Kendali Haluan

Untuk menjamin bahwa kapal dapat melakukan manuver menghindari tanpa memotong perimeter aman x , diperlukan kalkulasi waktu kritis terhadap kecepatan linier kapal v . Jarak bersih operasional yang tersedia sebelum mencapai batas kritis didefinisikan sebagai (1).

$$d_{\text{net}} = d_i - x \quad (1)$$

Jika kapal bergerak maju dengan kecepatan konstan v , maka sisa waktu kritis yang dimiliki sistem untuk memutar haluan sebelum menyentuh batas aman sesuai dengan (2).

$$t_{\text{kritis}} = \frac{d_i - x}{v} \quad (2)$$

Agar kapal bisa bergeser sejauh sudut datangnya rintangan $\Delta\psi$ sebelum waktu habis, target kecepatan sudut belok kapal y (dalam derajat per detik) harus memenuhi persamaan (3).

$$y = \frac{\Delta\psi}{t_{\text{kritis}}} = \frac{\Delta\psi \cdot v}{d_i - x} \quad (3)$$

Karakteristik belok kapal kemudian dipadukan dengan Model Kemudi Nomoto Orde Pertama (Ghommam et al, 2025). Model ini menghubungkan kecepatan sudut belok y dengan sudut fisik kemudi/rudder δ serta panjang lambung kapal L dan dituliskan seperti persamaan (4)

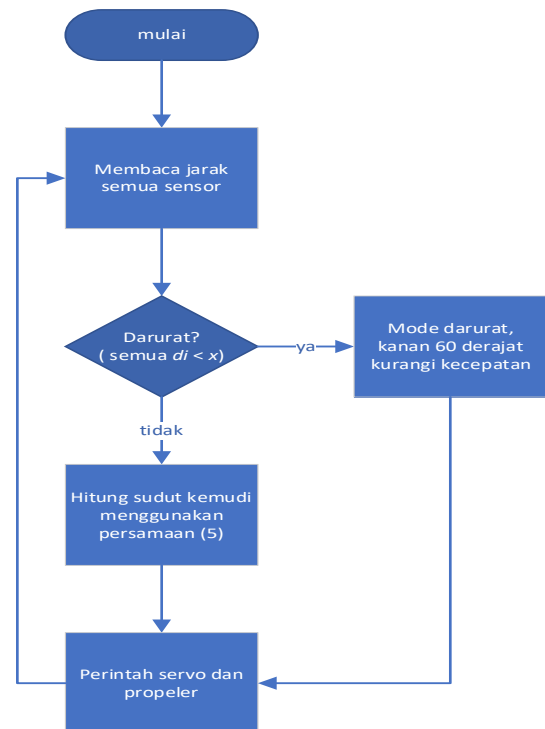
$$y = \frac{v}{L} \cdot K_h \cdot \delta \quad (4)$$

Variabel K_h merupakan konstanta gain hidrodinamika yang dipengaruhi oleh bentuk desain lambung dan ukuran sirip kemudi (Xu et al, 2025). Dengan menggabungkan kedua rumus (3) dan (4), variabel kecepatan v bisa dicoret dari kedua ruas, menghasilkan rumus final kendali kemudi otomatis seperti persamaan (5)

$$\delta = \frac{\Delta\psi \cdot L}{K_h \cdot (d_i - x)} \quad (5)$$

Melalui rumus ini, mikrokontroler kapal bisa langsung menentukan sudut servo *rudder* secara instan tanpa perlu memproses logika ambang batas.

2.2 Perancangan Diagram Alir Kendali Gambar 2 menunjukkan diagram alir dari sistem kendali pada kapal. Proses diawali dengan inisialisasi, yang kemudian diikuti oleh tahapan pengambilan data jarak secara simultan melalui seluruh sensor ultrasonik yang terpasang pada haluan kapal. Output dari pembacaan ini berupa nilai jarak dinamis dari masing-masing sensor ke-i. Setelah data jarak diperoleh, sistem memasuki tahapan evaluasi percabangan logika kondisional untuk mendeteksi tingkat kepekatan rintangan pada jalur navigasi.



Gambar 2. Diagram Alir Kendali Kapal

Evaluasi pertama dilakukan untuk memeriksa pemenuhan predikat logika, di mana seluruh sensor mendeteksi rintangan di bawah ambang batas aman minimum. Jika kondisi ini terpenuhi, sistem mengidentifikasi situasi sebagai terjebak di jalur buntu (*deadlock*). Sebagai langkah mitigasi struktural, sistem mengabaikan kalkulasi persamaan kontinu dan langsung mengaktifkan Mode darurat. Pada fase ini, sinyal PWM ke motor propeler direduksi untuk memperkecil radius putar minimum, sementara aktuator servo dikunci pada sudut maksimal atau dalam skenario ini pada 60 derajat ke arah kanan guna melakukan manuver penyelamatan diri (*escape maneuver*). Apabila kondisi darurat tidak terpenuhi, yang menandakan masih terdapat celah atau ruang manuver bebas di salah satu sektor haluan, sistem akan mengkalkulasi nilai sudut fungsional kemudi δ rumusan model kendali kontinu.

Pada tahap akhir dari siklus kendali, sinyal instruksi sudut dan kecepatan yang dihasilkan diteruskan ke unit aktuator fisik. Setelah perintah dieksekusi, sistem secara otomatis kembali ke tahapan awal untuk memperbarui data spasial rintangan, menjamin kontinuitas dan reaktivitas sistem kendali otonom selama kapal beroperasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Rekonstruksi

Tabel 1 menunjukkan rekonstruksi untuk beberapa skenario kapal. Konstanta prototipe kapal yang digunakan Adalah $L = 0.85$ m, $K_h = 1.25$, dan $x = 0.50$ m.

Tabel 1. Skenario Pengujian Algoritma Kendali

Skenario	Sensor Terdeteksi / Jarak (di)	Target $\Delta\psi$	Hasil δ	Aksi Fisik Aktuator (Servo & Motor)
Aman Kontinu	K22.5 / 2.00 m	22.5°	10.2°	10.2°, PWM Normal
Aman Kontinu	D/ 1.20 m	-	-	-21.9°, PWM Normal
Kiri Kritis	K45 / 0.55 m	45.0°	612°	Clamped +60.0°, PWM Normal
Kanan Kritis	N22.5/ 0.5 m	-45.0°	-510°	Clamped

				-60.0° PWM Normal
Blokade Total	Semua / < 0.5 m	Bypass	Bypass	Mode Darurat: Servo +60°, PWM Minimal

Hasil pengurangan antara jarak baca sensor aktual dengan batas aman minimum yang ditetapkan sistem ($x = 0.50$ m). Nilai ini bertindak sebagai variabel pembagi dinamis. Dalam skenario terdapat pembatasan Sudut (*Clamping*) karena rumus (5) menghasilkan nilai teoretis yang sangat tinggi. Di dalam mikroprosesor, nilai ini secara otomatis dipangkas (*clamped*) oleh fungsi batas maksimum servo agar aktuator tidak mengalami over-stroke atau rusak secara mekanis.

Pada skenario mode darurat, ketika semua sensor mendeteksi jarak di bawah ambang batas aman, logika sistem mengabaikan persamaan kontinu dan langsung mengeksekusi protokol penyelamatan buntu (*deadlock escape*).

3.2 Logika Penanganan Kondisi Khusus dan Darurat

Meskipun persamaan (5) bekerja secara kontinu, kendali kapal tetap membutuhkan lapisan logika pengawas untuk mengantisipasi jebakan ruang buntu. Algoritma navigasi ini dibagi menjadi tiga modul keputusan utama:

1. Kondisi Jelajah Normal $d_i > x$ dimana jalur air dianggap aman. Rumus dinamis menghasilkan nilai δ mendekati nol, membuat kapal berjalan lurus dan menghemat daya baterai.
2. Kondisi penghindaran sebagian yang terjadi saat rintangan terdeteksi di salah satu sisi (misalnya sisi kiri terhalang objek), sistem mengambil nilai $\Delta\psi$ positif untuk membelokkan kemudi ke arah kanan secara proporsional sesuai jarak rintangan tersebut.
3. Kondisi Blokade Total Darurat ketika $\forall d_i \leq x$ yaitu kelima sensor mendeteksi objek di bawah batas aman secara bersamaan, kapal dianggap terjebak. Sistem langsung memotong aliran daya motor penggerak utama (misalkan menurunkan nilai PWM ke batas

terendah) untuk menghilangkan momentum maju kapal akibat gaya inersia. Bersamaan dengan itu, servo kemudi langsung diarahkan pada posisi kanan dengan sudut maksimal (maksimal sudut belok). Kapal akan berputar tajam sampai sensor depan kembali melihat area perairan yang terbebas dari halangan.

3.3 Pembahasan

Penggunaan formula (5) menyelesaikan kelemahan mekanis yang biasa ditemukan pada prototipe kapal otonom berbasis logika sakelar. Ketika kemudi dipaksa bergerak agresif secara ekstrim dari 0° langsung ke 45° , terjadi lonjakan arus listrik pada baterai dan timbul kejutan mekanis pada transmisi servo. Dengan persamaan 5, pergerakan servo melandai dan bergerak mulus mengikuti perubahan jarak objek. Aliran air di sekitar daun kemudi (*rudder blade*) juga tetap terjaga dalam kondisi laminar, sehingga meminimalkan hambatan air (*drag force*) yang bisa memperlambat kapal.

Penerapan konfigurasi lima sensor dengan jarak rapat 22.5° meminimalisir permasalahan hilangnya jejak objek (*blind spot*) saat kapal membelok. Pada model tiga sensor standar, terdapat celah kosong yang cukup besar di sudut haluan. Jeda kosong ini berbahaya karena kapal bisa menganggap jalur sudah aman padahal rintangan belum sepenuhnya terlewat.

Pada modul darurat, keputusan untuk menurunkan PWM motor ke level terendah dan mengunci kemudi di angka 600. Rumus kontinu memiliki kelemahan matematis berupa nilai tidak terhingga saat nilai jarak pembacaan di sama persis dengan batas aman x . Dengan memotong persamaan 5 tersebut saat kondisi darurat, sistem terhindar dari error. Penurunan kecepatan motor akan langsung memangkas radius putar minimum kapal, sehingga prototipe dapat berputar tajam menyerupai gerakan poros (*pivot*) untuk meloloskan diri dari area sempit tanpa menabrak dinding rintangan.

Salah satu keterbaruan teoretis paling penting dalam pemodelan rumus ini adalah hilangnya variabel kecepatan v dan parameter waktu kritis t_{kritis} dari persamaan final kendali kemudi. Secara matematis, parameter waktu respons melebur ketika disandingkan dengan model kemudi Nomoto orde pertama. Fenomena eliminasi variabel ini memberikan keuntungan teknis pada

implementasi perangkat keras kapal. Sistem kontrol tidak lagi memerlukan sensor kecepatan tambahan.

Meskipun variabel kecepatan tidak dihitung secara eksplisit oleh program, sistem kendali ini tetap adaptif terhadap dinamika kecepatan kapal. Hal ini terjadi berkat adanya kompensasi hidrodinamika alami pada lambung kapal. Ketika kapal melaju pada kecepatan v tinggi, sisa waktu untuk menghindari tabrakan memang menyusut drastis. Namun, aliran fluida yang melewati daun kemudi pada saat yang sama menjadi lebih deras, sehingga menghasilkan gaya angkat (*lift force*) dan gaya belok yang jauh lebih besar (Yasukawa et al, 2021; Abramowicz-Gerigk et al, 2022). Sebaliknya, pada saat kapal bergerak lambat, hilangnya gaya belok aktual terkompensasi oleh melonggarnya sisa waktu respons yang tersedia. Dengan demikian, arsitektur kendali haluan yang dirancang tetap dapat mengeksekusi radius putar pada berbagai variasi kecepatan jelajah tanpa memerlukan umpan balik dari sensor kecepatan.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan, maka disimpulkan bahwa:

- a. Penelitian ini berhasil merancang sistem kendali haluan otonom untuk *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) menggunakan pendekatan logika kontinu berbasis susunan lima sensor ultrasonik. Konfigurasi geometri sensor dengan distribusi sudut simetris terbukti efektif mengeliminasi titik buta (*blind spot*) pada area haluan, serta memberikan resolusi transisi objek yang lebih rapat melalui penambahan sudut *intermediate* 22.5° . Integrasi matematis antara waktu kritis menghindari objek dan Model Kemudi Nomoto Orde Pertama berhasil merumuskan algoritma kendali baru tanpa ketergantungan pada batas ambang (*threshold*) statis. Berdasarkan hasil pengujian skenario spasial, formula kontinu yang diusulkan mampu menghasilkan respon sudut kemudi secara proporsional dan melandai pada kondisi jelajah normal. Pada kondisi kritis dan blokade total, logika kontrol melakukan intervensi dengan memotong kalkulasi rumus, mengunci servo pada batas mekanis maksimal $+60^\circ$, serta mereduksi kecepatan motor utama untuk memangkas radius putar minimum kapal. Kontribusi teoretis utama dari arsitektur

kendali ini terletak pada eliminasi parameter kecepatan v dan waktu kritis. Dengan demikian, sistem kendali yang dirancang tidak memerlukan sensor kecepatan tambahan. Sebagai pengembangan berikutnya, penelitian selanjutnya akan berfokus pada tahapan implementasi langsung dan pengujian performa algoritma ini pada prototipe fisik kapal di lingkungan perairan dinamis berskala nyata untuk memvalidasi keselarasan model matematika dengan dinamika fluida aktual.

Daftar Pustaka

- Abramowicz-Gerigk, T., & Burciu, Z. (2022). Investigations of Hydrodynamic Force Generated on the Rotating Cylinder Implemented as a Bow Rudder on a Large-Scale Ship Model. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22. <https://doi.org/10.3390/s22239137>
- Chang, H.-C., Hsu, Y.-L., Hung, S., Ou, G.-R., Wu, J.-R., & Hsu, C. (2021). Autonomous Water Quality Monitoring and Water Surface Cleaning for Unmanned Surface Vehicle. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21.
- Ghommam, Jawhar, et al. "Adaptive prescribed time path following controller for underactuated surface vessels." *2025 13th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*. IEEE, 2025.
- Hosseinzadeh, S., Hudson, D., Turnock, S. R., Prince, M., & Banks, J. (2025). Influence of hull-propeller-rudder interaction on the self-propulsion of wind-assisted ships. *Physics of Fluids*. <https://doi.org/10.3390/s21041102>
- Mendes, Calebe Pereira, and Norman T-Lon Lim. "EcoLiDAR: An economical LiDAR scanner for ecological research." *Plos one* (2024).
- Raj, T., Hanim Hashim, F., Baseri Huddin, A., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*, 9(5), 741.
- Saptoe, J., Van Aardt, S., Smith, F., & Hatefi, S. (2025). Unmanned surface vehicle with deep learning-based obstacle avoidance for water quality monitoring. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202541710002>
- Xu, H., & Soares, G. C. (2025). Review of System Identification for Manoeuvring Modelling of Marine Surface Ships. *Journal of Marine Science and Application*, 24, 459 - 478. <https://doi.org/10.1007/s11804-025-00681-w>
- Yasukawa, H., Ishikawa, T., & Yoshimura, Y. (2021). Investigation on the rudder force of a ship in large drifting conditions with the MMG model. *Journal of Marine Science and Technology*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00789-4>
- Zhang, Ting, Zhiming Wang, and Peiliang Wang. "A method for compressing AIS trajectory based on the adaptive core threshold difference Douglas-Peucker algorithm." *Scientific Reports* 14.1 (2024): 21408.
- Zube, A., Kleiser, D., Albrecht, A., Woock, P., Emter, T., Ruf, B., Tchouchenkov, I., Buller, A., Wagner, B., Baatar, G., & Petereit, J. (2022). Autonomously mapping shallow water environments under and above the water surface. *at - Automatisierungstechnik*, 70, 482 - 495. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0145>