

Jornadas de Automática

Control Visual Autónomo Bioinspirado con Vehículos Submarinos Teleoperados (ROVs)

Sainz, Jose Joaquin^a, Becerra, Victor^b, Revestido Herrero, Elías^{a*}, Llata, Jose Ramon^a, Torre-Ferrero, Carlos^a

^aDepartamento de tecnología electrónica, ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros, s/n, Santander, 39005, Spain.

^bSchool of Energy and Electronic Engineering, University of Portsmouth, Portsmouth, PO1 3DJ, United Kingdom

To cite this article: Sainz, Jose Joaquin, Becerra, Victor, Revestido Herrero, Elías, Llata, Jose Ramon, Torre-Ferrero, Carlos. 2025. Bioinspired Visual Surge Control of a ROV. Jornadas de Automática, 46.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12238>

Resumen

Este artículo presenta una aplicación novedosa de la teoría de control bioinspirada para Vehículos teleoperados (ROVs). Basado en los mecanismos utilizados por aves e insectos para acercarse a objetos, el sistema propuesto aplica la teoría del tiempo hasta el contacto (τ) para controlar de forma autónoma el movimiento de avance del ROV hacia estructuras submarinas, utilizando los datos captados por una única cámara a bordo. Una vez que el ROV alcanza la proximidad deseada mediante este controlador visual bioinspirado, el sistema cambia del control visual en el eje de avance a un sistema de posicionamiento Sliding Mode Controller (SMC), con el fin de mantener su posición alrededor del objetivo. Para evaluar la efectividad del método propuesto, se utilizó un simulador visual y se realizaron simulaciones en el entorno cerca de un pilar submarino. Estas pruebas demostraron un rendimiento fiable del sistema de control visual. En resumen, este enfoque bioinspirado representa un avance significativo en el campo, ya que permite la realización autónoma de tareas de inspección y supervisión. Esto no solo mejora la seguridad operativa, sino que también tiene el potencial de reducir considerablemente los costos de las operaciones submarinas **Palabras clave:** Posicionamiento Dinámico, Vehículos marinos no tripulados, Programación y Visión, Bioinspiración.

Bioinspired Visual Surge Control of a ROV

Abstract

This paper presents a novel application of biologically inspired control theory to Remotely Operated Vehicles (ROVs). Drawing from the mechanisms used by birds and insects to approach objects, the proposed system applies the time-to-contact (τ) theory to autonomously control an ROV's surge motion toward underwater targets using data from a single onboard camera. Once the ROV reaches the desired proximity to the object through this bio-inspired visual controller, the system transitions from visual-based surge control to the vehicle's built-in positioning system to maintain its location near the target. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a visual computer simulator was employed, and simulations were conducted in two distinct environments: near an underwater pillar and around a floating structure. These tests demonstrated the reliable performance of the visual control strategy. Overall, this bio-inspired approach marks a significant advancement in the field, enabling autonomous inspection and supervision tasks. It enhances operational safety and offers the potential to significantly reduce the costs associated with underwater operations. **Keywords:** Dynamic positioning, Unmanned marine vehicles, Programming and Vision, Bioresponses.

1. Introducción

Las operaciones subacuáticas requieren herramientas robustas debido a las condiciones extremas y riesgos implicados en las citadas operaciones. Los vehículos subacuáticos teleoperados (ROVs) son en los últimos años y

cada vez más fundamentales para estas tareas, ya que evitan poner en riesgo vidas humanas (Summers, 2022, Skaldebo, 2023). Sin embargo, la dependencia de los operadores humanos limita la exactitud y precisión de ciertas maniobras, especialmente aquellas que requieren una proximidad cercana

*Autor para correspondencia: revestidoe@unican.es

a estructuras submarinas. La percepción de profundidad mediante cámaras es complicada y no siempre fiable.

Con el avance de los vehículos subacuáticos no tripulados y los sistemas de control autónomo, ha habido un creciente interés en automatizar estos procesos. Este artículo presenta un enfoque innovador: un sistema de control visual autónomo bioinspirado que imita el comportamiento de aterrizaje de aves e insectos (Horridge, 1987). Este controlador permite al ROV acercarse a estructuras submarinas usando solo una cámara, sin depender de sensores costosos o complejos como el sonar o el GPS submarino. Una vez que el vehículo alcanza la distancia deseada, se activa automáticamente un cambio de control hacia un controlador SMC, que mantiene al ROV estable en su posición. Este enfoque promete incrementar la seguridad y reducir significativamente los costos operativos.

Tradicionalmente, la localización y navegación de ROVs ha dependido de tecnologías de posicionamiento acústicas como los sistemas de posicionamiento ultra short base line (USBL) (Zhang, 2022), que, si bien ofrecen cierta exactitud, presentan limitaciones operativas (Srinivasan, 1996). Además, las condiciones subacuáticas pueden distorsionar señales, dificultando una estimación exacta de posición y orientación.

Por otro lado, aunque el sonar es útil, su interpretación en tiempo real por operadores humanos presenta cierto grado de dificultad. Las cámaras subacuáticas han mejorado en calidad en los últimos años, y su integración en ROVs ha abierto nuevas posibilidades para desarrollar algoritmos de navegación basados en visión artificial. No obstante, muchos enfoques dependen del reconocimiento de objetos previamente conocidos, lo cual limita su aplicabilidad en entornos dinámicos o desconocidos.

Este trabajo se inspira en la biología, concretamente en la forma en que las aves y algunos insectos aterrizan controlando el flujo óptico (Alkowitz, 2013, Armendariz, 2021). Las aves, por ejemplo, ajustan su velocidad de forma natural al percibir cambios en la dilatación de imagen del objeto al que se aproximan. Este principio es adaptado en el presente artículo para que un ROV pueda calcular la distancia a un objeto y reducir su velocidad de forma controlada hasta alcanzar una posición segura.

2. Modelo dinámico de Maniobra

El ROV objeto de estudio de este trabajo (Figura 1) (Benzon, 2022) presenta seis grados de libertad: desplazamiento en los tres ejes (x, y, z) y rotaciones en torno a ellos o lo que se conoce como ángulos de Euler (roll, pitch, yaw). Se utilizan dos sistemas de referencia: uno fijo a la Tierra (marco NED) y otro vinculado al cuerpo del vehículo. El modelo dinámico incluye términos complejos como la masa añadida, efectos de Coriolis, fuerzas de restauración (gravedad y flotabilidad) y amortiguamiento hidrodinámico.

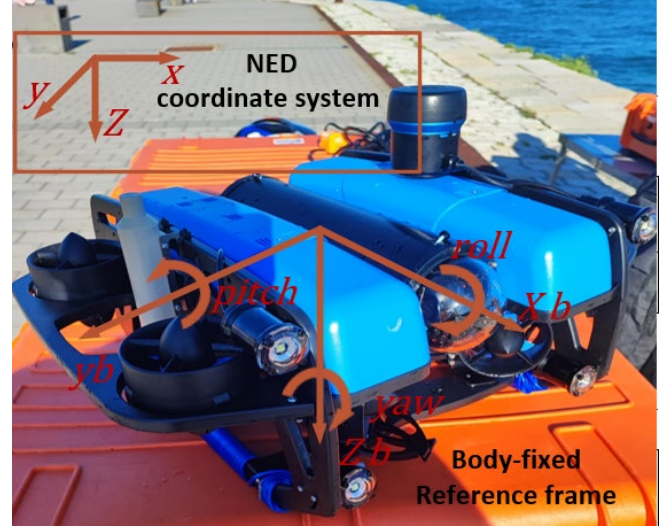


Fig. 1. Sistema de referencia del cuerpo y NED.

El modelo de maniobra no lineal puede expresarse de la siguiente forma (Fossen, 2002):

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = T_c \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2)$$

Donde $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ es el vector de posición y ángulos de Euler, $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ son las velocidades lineales y las velocidades angulares, $T_c = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ son las fuerzas y momentos. ω es el ruido de medición. M es la matriz del cuerpo rígido y la masa añadida, $C(v)v$ es el término de Coriolis, $g(\eta)$ es la matriz de restauración, $J(\eta)$ es la matriz de rotación y $D(v)v$ representa las fuerzas de amortiguamiento hidrodinámico que son una combinación de amortiguamiento lineal y no lineal. La relación cinemática entre la velocidad v en el sistema de coordenadas fijas al cuerpo y la posición η en el sistema de coordenadas NED (North East Down) viene dada por:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} J_{1A} & J_{1B} & J_{1C} \\ J_{1D} & J_{1E} & J_{1F} \\ J_{1G} & J_{1H} & J_{1I} \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} J_{1A} &= \cos(\psi)\cos(\theta) \\ J_{1B} &= -\sin(\psi)\cos(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1C} &= \sin(\psi)\sin(\phi) + \cos(\psi)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1D} &= \sin(\psi)\cos(\theta) \\ J_{1E} &= \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) \\ J_{1F} &= -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\cos(\phi) \\ J_{1G} &= -\sin(\theta) \\ J_{1H} &= \cos(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1I} &= \cos(\theta)\cos(\phi) \end{aligned} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} J_2(\eta) \\ 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) / \cos(\theta) & \cos(\phi) / \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento del vehículo consideran tanto la dinámica del cuerpo rígido como la interacción con el entorno acuático. La matriz de rotación transforma las velocidades del marco del cuerpo al marco NED, permitiendo calcular las posiciones globales.

Este modelo proporciona la base sobre la cual se integra el controlador visual bioinspirado. Al comprender la dinámica realista del ROV, se puede evaluar con exactitud cómo el controlador tendrá un efecto considerable sobre su movimiento y desempeño bajo diferentes condiciones de operación.

3. Diseño del Controlador Visual Bioinspirado

La esencia del controlador es replicar el comportamiento visual que tienen ciertos animales al aterrizar. Se basa en la teoría del tiempo hasta el contacto (τ), que relaciona la velocidad con la distancia al objeto mediante la dilatación de la imagen capturada por la cámara. Cuando un objeto se acerca, su imagen se agranda, y esta variación puede ser medida y utilizada para ajustar la velocidad, ver Figura 2.

La clave de control reside en el parámetro de ajuste k , que regula la intensidad de la aproximación. Valores bajos de k implican acercamientos suaves o sin contacto; valores altos, aproximaciones más agresivas. Cuando el vehículo alcanza una distancia crítica, el sistema cambia automáticamente al controlador SMC que se encarga de mantener la posición sin colisiones.

Esta estrategia consiste en disminuir tanto la velocidad como la distancia hasta el aterrizaje con un flujo óptico ventral constante (Armendariz, 2021):

$$\omega_z = \frac{v_z(t)}{z(t)} \quad (7)$$

donde $v_z(t)$ es la velocidad y $z(t)$ es la distancia al elemento a conectar a tierra.

El flujo óptico es la velocidad de la imagen para cada píxel. La velocidad de la imagen es $V = (u_i, v_i)$ y los componentes de la velocidad del flujo óptico son u_i y v_i .

donde,

$$u_i = \frac{d_z}{dt} \quad (8)$$

$$v_i = \frac{d_y}{dt} \quad (9)$$

El esquema del controlador visual propuesto se muestra en la Fig. 2, modificando la variable k permite controlar la dinámica de la distancia de aproximación al objeto controlando la suavidad de la aproximación al objeto.

Aplicando esta teoría a la aproximación x , la distancia del ROV al objeto a aproximar es $x > 0$ la dilatación de la imagen w_x es:

$$w_x = \frac{x}{\dot{x}} \quad (10)$$

Por lo tanto τ es :

$$\tau = -\frac{1}{w_x} \quad (11)$$

Para calcular el flujo óptico, se aplica el método de Horn y Schunck (Horn, 2022) que estima el campo de velocidades en una imagen suponiendo una transición suave entre píxeles. Posteriormente, se utiliza un modelo de movimiento traslacional estimado mediante regresión por mínimos cuadrados sobre múltiples puntos, lo que permite obtener parámetros visuales robustos incluso ante ruido.

La función de costo en los citados calculos del parrafo anterior es:

$$\int_D \left(\epsilon_b^2 + \alpha^2 \left(\frac{d^2 u}{d^2 x} + \frac{d^2 u}{d^2 y} + \frac{d^2 v}{d^2 x} + \frac{d^2 v}{d^2 y} \right)^2 \right) d_p \quad (12)$$

donde

$$\epsilon_b = \left(I_x(p, t)u + I_y(p, t)v + I_x(p, t) \right) \quad (13)$$

Donde α es factor el factor de ponderación, D es el dominio de la imagen.

Por otra parte, para la estimación de los parámetros de movimiento de la imagen, se han aplicado mínimos cuadrados a partir de múltiples puntos. Dichos puntos, se utiliza para estimar los diferentes parámetros visuales y rechazar el ruido en un único proceso, como se muestra en las contribuciones de (Armendariz et al., 2013, Alkowitz et al., 2019, Armendariz Puente, 2021).

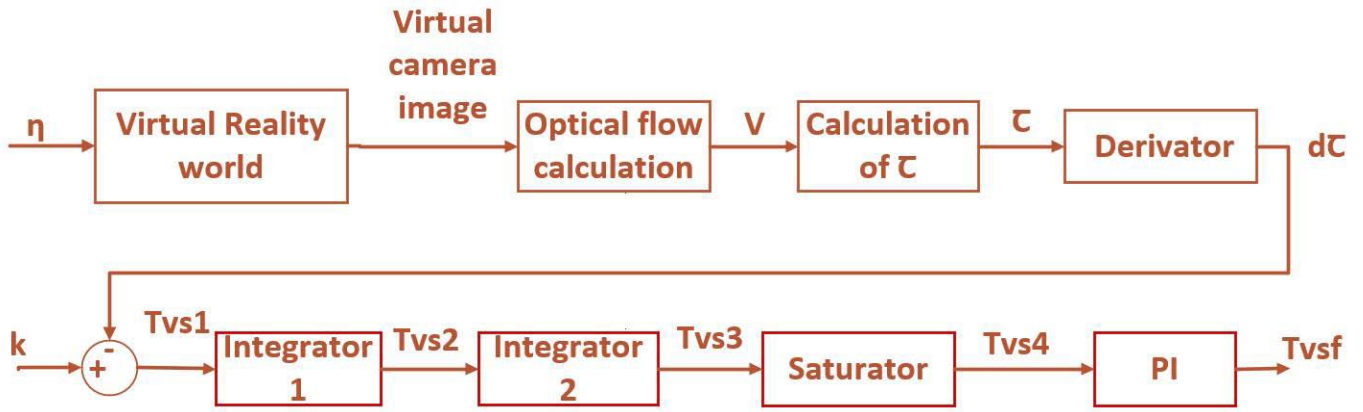


Fig. 2. Esquema de control visual autónomo bioinspirado.

4. Resultados de Simulación

Se han llevado a cabo simulaciones con el ROV BlueROV2 en la aproximación a una columna de una estructura sumergida, ver Figura 3.

Con $k = 0.2989$, el ROV se acerca lentamente sin impactar la estructura. Una vez cerca, el controlador cambia automáticamente y se estabiliza. La posición y orientación se mantienen dentro de parámetros aceptables, sin oscilaciones notables.

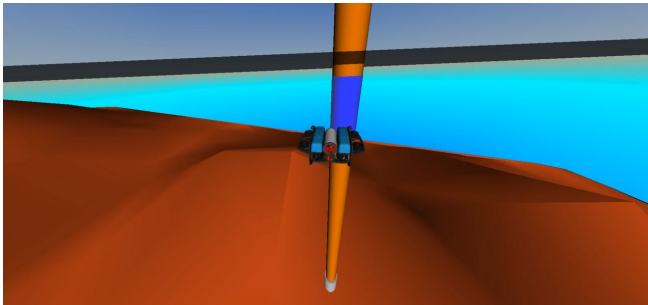


Fig. 3. Simulación de la imagen de la cámara.

Se puede observar en la Fig. 4 que el controlador visual bioinspirado es capaz de acercar el ROV a la columna sin colisionar y una vez en un punto muy cercano sin colisionar cambia al controlador previamente incorporado en el simulador open-source benchmark manteniendo esta posición. El ajuste k del controlador visual es bajo y por tanto el resultado es coherente con el conocimiento teórico ya que no colisiona con la columna.

En la Fig. 5 se puede observar como la actuación del control visual no conlleva una pérdida de control en el posicionamiento y y z . Los valores de las desviaciones angulares son despreciables manteniendo las posiciones angulares iniciales durante todo el proceso, por esta razón, no se muestran las figuras.

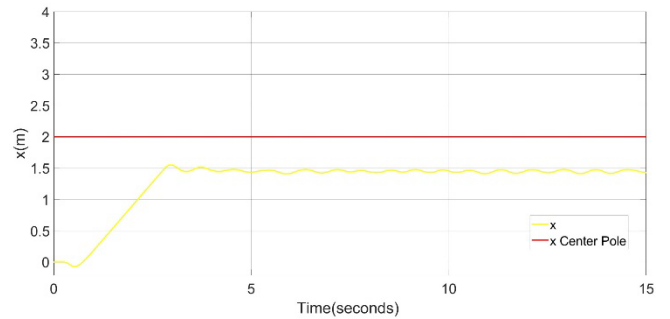


Fig. 4. Resultados de aproximación en surge $x(m)$ a la columna para $k=0,2989$.

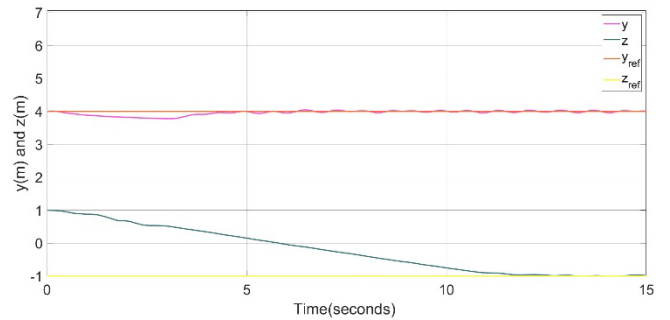


Fig. 5. Resultados de aproximación en $y(m)$ y $z(m)$ a la columna para $k=0,2989$.

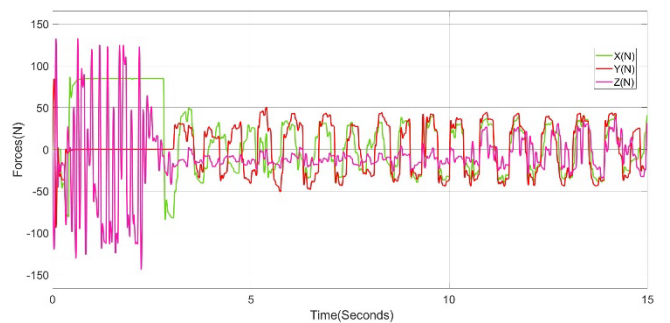


Fig. 6. Fuerzas resultantes de aproximación a la columna para $k=0,2989$.

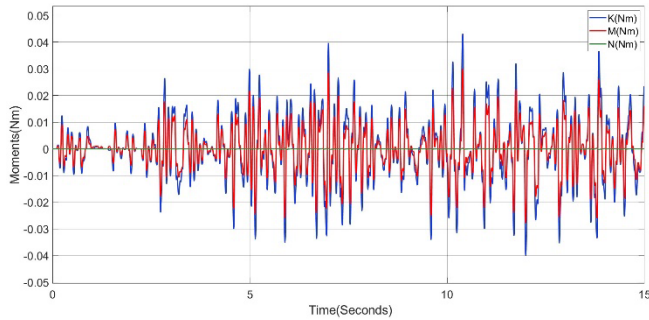


Fig. 7. Momentos resultantes de aproximación a la columna para $k=0,2989$.

Por último, las fuerzas y momentos están dentro de valores razonables. No hay grandes oscilaciones ni esfuerzos elevados en las señales de control que no puedan asumirse, como puede verse en las Fig. 6 y Fig. 7.

5. Conclusiones

El controlador visual bioinspirado propuesto permite realizar aproximaciones precisas a estructuras submarinas usando solo una cámara. Esto representa un avance considerable frente a los métodos tradicionales de posicionamiento, que pueden presentar errores del orden de metros.

En resumen, este trabajo propone una estrategia novedosa que reduce la necesidad de intervención humana, mejora la seguridad y baja los costos operativos. Abre el camino hacia una mayor autonomía de los ROVs en operaciones de precisión.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente financiado a través del proyecto TED2021-132158B-I00 Evolutionary Monitoring with Unmanned Underwater Vehicles for the Maintenance of the bottom and Anchorages of Offshore Wind Farms financiado por el MICIU/ AEI /10.13039/501100011033 y por la Unión Europea - Next Generation EU/ PRTR (Figura 8) y a través del proyecto Intelligent and Collaborative Control of Unmanned Underwater Vehicles for the Dynamic

Positioning of Floating Marine Structures at Scale (Ayuda Financiada por Contrato Programa Gob Cantabria-UC).



Fig. 8. MICIU/ AEI /10.13039/501100011033 y la Unión europea- Next GenerationEU/PRTR

Referencias

- Alkawatly ,M. T., V. M. Becerra and W. Holderbaum, "Estimation of Visual Motion Parameters Used for Bio-inspired Navigation," Journal of Image and Graphics, vol. 1, pp. 120-124, 2013.
- Armendariz S., V. Becerra and N. Bausch, "Bio-inspired autonomous visual vertical and horizontal control of a quadrotor unmanned aerial vehicle," Electronics (Basel), vol. 8, p. 184, 2019.
- Armendariz ,S. Puente, "Bio-Inspired Autonomous Visual Vertical and Horizontal Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle," 2021.
- Benzon M. von, F. F. Sørensen, E. Uth, J. Jouffroy, J. Liniger and S. Pedersen, "An Open-Source Benchmark Simulator: Control of a BlueROV2 Underwater Robot," Journal of marine science and engineering, vol. 10, p. 1898, 2022
- Fossen T. I., Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics, 2002.
- Fossen T. I., Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley and Sons, Ltd, 2011.
- Horridge A. G., "The evolution of visual processing and the construction of seeing systems," Proc. Royal Soc. London B230, pp. 279-292, 1987.
- Horn B. K. P. and B. G. Schunck, "Determining optical flow," Artificial intelligence, vol. 17, pp. 185-203, 1981. Summers N., G. Johnsen, A. Mogstad, H. Løvås, G. Frago and J. Berge, "Underwater Hyperspectral Imaging of Arctic Macroalgal Habitats during the Polar Night Using a Novel Mini-ROV-UHI Portable System," Remote sensing (Basel, Switzerland), vol. 14, p. 1325, 2022.
- Skaldebo M., H. B. Amundsen, B. Su and E. Kolasidi, "Modeling of Remotely Operated Vehicle (ROV) Operations for Aquaculture," 2023. Baker, R. C., 1963a. Título del artículo. Nombre de la revista 34, 184–186. DOI: 10.3923/ijbc.2010.190.202
- Srinivasan M. V., S. W. Zhang, M. Lehrer and T. S. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal: Visual flight control and odometry," Journal of experimental biology, vol. 199, pp. 237-244, 1996.
- Zhang Y.-x., Q.-f. Zhang, A.-q. Zhang, J. Chen, X. Li and Z. He, "Acoustics-Based Autonomous Docking for A Deep-Sea Resident ROV," China ocean engineering, vol. 36, pp. 100-111, 2022.