

Penelitian ini menyajikan pengembangan dan evaluasi eksperimental dari robot ikan lunak yang dilengkapi dengan sistem aktuasi pneumatik serta berbagai strategi kendali untuk meniru gerakan ikan alami ikan di lingkungan bawah air. Robot ini dirancang untuk mereplikasi gerakan undulasi ekor ikan biologis serta mencapai navigasi dan manuverabilitas yang presisi dalam skenario pelacakan target statis maupun dinamis.

Lima metode kontrol (Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), Proporsional Derivatif (PD), Proporsional Integral Derivatif (PID), dan Interpolasi Linear) diimplementasikan dan dianalisis secara komparatif. Masing-masing pendekatan diuji pada dua kondisi berbeda: pelacakan statis, dimana posisi target tetap, dan pelacakan dinamis, dimana posisi target bergerak seiring waktu.

Dalam skenario pelacakan statis, kontrol PID menunjukkan performa terbaik secara keseluruhan dengan nilai MAE sebesar 10,30 piksel dan IAE sebesar 78,89 piksel.detik, serta waktu konvergensi sekitar 7,2 detik. Sementara itu, kontrol PI mencatat nilai MAE terendah (8,46 piksel), namun membutuhkan waktu konvergensi paling lama (14,35 detik). Dalam pelacakan dinamis, PID kembali menjadi metode terbaik dengan MAE sebesar 92,89 piksel, RMSE sebesar 97,09 piksel, dan simpangan baku sebesar 28,24 piksel. Sebaliknya, metode interpolasi linear menunjukkan performa paling lemah dalam skenario dinamis karena sifatnya yang tidak adaptif.

Eksperimen manuver belok dengan konfigurasi tekanan udara asimetris menunjukkan bahwa peningkatan perbedaan tekanan antara sisi ekor menghasilkan radius belok yang lebih kecil, yang memvalidasi kemampuan robot dalam meniru perilaku belok alami ikan. Hasil-hasil ini memberikan kontribusi penting dalam desain sistem robot lunak bawah air dengan kemampuan navigasi dan manuverabilitas yang lebih baik.

Kata kunci Ikan Robotik Lunak, Kontrol PID, Aktuasi Pneumatik, Target Statis, Target Dinamis.

ABSTRACT

This research presents the development and experimental evaluation of a soft robotic fish equipped with a pneumatic actuation system and multiple control strategies to mimic natural fish-like motion. The robot is designed to replicate the undulating tail motion of biological fish and to achieve precise navigation and maneuverability in both static and dynamic target tracking scenarios.

Five control methods (Proportional (P), Proportional Integral (PI), Proportional Derivative (PD), Proportional Integral Derivative (PID), and Linear Interpolation) were implemented and comparatively analyzed. Each control approach was evaluated under two distinct conditions: *static tracking*, where the target position remains constant, and *dynamic tracking*, where the target moves over time.

In the static tracking scenario, the PID controller demonstrated the best overall performance, with MAE of 10,30 pixels and IAE 78,89 pixels.s, achieving convergence in approximately 7,62 seconds. The PI controller recorded the lowest MAE (8,46 pixels) but required the longest convergence time (14,35 s). In the dynamic tracking scenario, PID again outperformed other methods with an MAE of 92,89 pixels, RMSE of 97,09 pixels, and STD of 28,24 pixels. Meanwhile, the linear interpolation method showed the weakest performance in dynamic scenarios due its non-adaptive nature.

Turning maneuver experiments using asymmetric pressure configurations revealed that increasing the pressure differential between the tail sides resulted in a reduced turning radius, validating the robot's ability to replicate natural fish movement. These results contribute to the design of underwater soft robotic systems with enhanced navigation and maneuverability.

Keywords : Soft Robotic Fish, PID Control, pneumatic actuation, static target, dynamic target.