

TUGAS OPTIMISASI
ENERGY-EFFICIENT GAIT OPTIMIZATION OF SNAKE-LIKE
MODULAR ROBOTS BY USING MULTIOBJECTIVE
REINFORCEMENT LEARNING AND A FUZZY INFERENCE
SYSTEM



Oleh:

Muhmammad Choerul Chamdani (G1D021037)

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BENGKULU
2024

ABSTRAK

Robot modular mirip ular sangatlah fleksibel, tetapi untuk melintasi medan yang menantang atau menjelajahi wilayah tertentu, membutuhkan penggerak yang efisien tergantung pada keseimbangan antara tujuan seperti kecepatan dan konsumsi daya robot. Studi ini mengembangkan algoritma pembelajaran penguatan multiobjektif berdasarkan sistem inferensi fuzzy untuk memilih parameter gaya berjalan MR mirip ular yang paling tepat menurut bobot tujuan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja robot dalam berbagai kondisi medan. Dengan mempertimbangkan beberapa tujuan, seperti kecepatan maju dan konsumsi daya, metode yang diusulkan berusaha untuk mencapai keseimbangan antara kinerja dan efisiensi energi. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan dapat menghasilkan gerakan yang lebih efisien dan adaptif, yang dapat diterapkan dalam berbagai skenario dunia nyata.

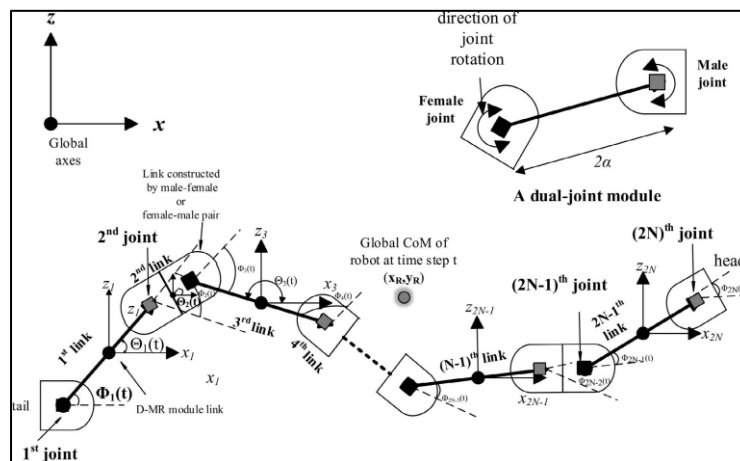
Kata Kunci: Efisiensi energi, sistem inferensi fuzzy, optimasi gaya berjalan, robot modular, pembelajaran penguatan multiobjektif, robot modular mirip ular.

1. PENDAHULUAN

Robot modular (MR) yang terdiri dari modul-modul individu yang dapat beradaptasi untuk melakukan berbagai tugas dengan mengubah bentuk dan perilakunya secara otonom. Robot modular ini memiliki kemampuan untuk menambahkan atau menghapus modul, sehingga memungkinkan mereka untuk membentuk morfologi yang berbeda dan menjadi self-reconfigurable.

Fokus utama dari penelitian ini adalah pada robot modular mirip ular, yang menarik perhatian karena fleksibilitas dan aplikasinya dalam situasi di mana kehadiran manusia mungkin berisiko, seperti operasi militer, eksplorasi luar angkasa, dan inspeksi bawah air. Dalam konteks ini, robot-robot ini sering kali menghadapi tantangan dalam bergerak di medan yang sulit, sehingga penting untuk mengoptimalkan gerakan mereka agar lebih efisien dan efektif.

Kontribusi yang diharapkan dari jurnal tersebut diantaranya metode FI-MORL yang diusulkan dapat secara sistematis menyeimbangkan dua tujuan yang bertentangan yaitu kecepatan dan konsumsi daya, sistem inferensi fuzzy dikembangkan untuk mengurangi jumlah kemungkinan keadaan, sehingga mengurangi beban komputasi dan mencapai konvergensi yang lebih cepat serta diharapkan dapat mencapai pergerakan terbaik setelah mengubah bobot dengan mengatasi dua tujuan tersebut.



Gambar 1. Parameter Kinematika 2D Robot Snake-Like MR

2. MODEL SISTEM

Sebuah robot snake-like MR terdiri dari banyak modul terhubung dan satu sama lainnya memiliki satu atau lebih aktuator dan sambungan. dalam konteks ini,

modul yang digunakan adalah dual-joint Dtt Explorer MR (D-MR), yang terinspirasi oleh modul M-TRAN yang bergerak di permukaan horizontal. Dalam penelitian ini, N modul D-MR identik yang dihubungkan sepanjang sumbu yang sama untuk membangun MR seperti ular. Setiap modul berisi Pusat Massa (CoM) di posisi tengahnya dengan panjang 2 dan massa m . Setiap modul memiliki dua sambungan bermotor (sambungan ``jantan" dan ``betina"), yang secara kolektif bertanggung jawab untuk memberikan gerakan pada MR seperti ular pada setiap langkah waktu.

Untuk representasi matematis model kinematik MR seperti ular, diadopsi konvensi Denavit Hartenberg, sebuah metode sistematis untuk mendefinisikan model kinematika dari setiap mekanisme yang terhubung secara serial. Tautan yang terhubung ke sambungan dapat bekerja dalam arah searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam.

3. DAYA PENGGERAK ROBOT SNAKE-LIKE MR

3.1 Kontrol Daya Penggerak

Kontrol locomotion (gerakan) untuk robot modular mirip ular dijelaskan dengan menggunakan konsep kurva serpenoid yang dikembangkan oleh Hirose. Mekanisme robot multi-DoF yang terhubung secara serial dapat menggunakan kontrol berbasis kurva serpenoid untuk menghasilkan gerakan seperti ular dengan mengadopsi kurva gerakan yang berbeda. Dengan menggunakan kontrol berbasis kurva serpenoid, robot modular mirip ular dapat mengatur gerakan setiap modul secara independen, sehingga memungkinkan fleksibilitas dalam navigasi dan adaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan.

3.2 Matriks Kinerja

Robot Snake-like MR memiliki energi yang terbatas; oleh karena itu, muncul kebutuhan untuk mengendalikan gaya berjalan guna mencapai pergerakan yang ekonomis. Maka dibuat dua buah matrik kinerja untuk mengevaluasi efisiensi energi gaya berjalan: daya yang dikonsumsi oleh MR seperti ular dan kecepatan maju rata-ratanya. Kecepatan maju dan konsumsi daya sebagai metrik kinerja memastikan MR seperti ular bergerak lebih cepat dengan konsumsi daya minimum

4. MULTIOBJEKTIF ALGORITMA REINFORCEMENT LEARNING DENGAN SISTEM INTERFERENSI FUZZY

Pengembangan algoritma pembelajaran penguatan multi-objektif yang mengintegrasikan sistem inferensi fuzzy (FI-MORL) untuk mengoptimalkan gerakan robot modular mirip ular.

Tujuan Pengembangan FI-MORL: Algoritma FI-MORL dirancang untuk memilih parameter gait (gerakan) yang paling sesuai untuk robot modular mirip ular berdasarkan bobot tujuan yang berbeda. Dengan menggunakan sistem inferensi fuzzy, algoritma ini dapat mengurangi jumlah keadaan yang mungkin, sehingga mempercepat proses pembelajaran.

Pengurangan Jumlah Keadaan: Sistem inferensi fuzzy digunakan untuk menyederhanakan ruang keadaan yang kompleks. Dengan mengelompokkan keadaan-keadaan yang serupa, algoritma dapat lebih cepat dalam menentukan tindakan yang optimal, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi pembelajaran.

Adaptasi terhadap Perubahan Bobot: FI-MORL mampu dengan cepat belajar strategi locomotion ketika terjadi perubahan bobot pada tujuan. Ini berarti bahwa algoritma dapat menyesuaikan diri dengan perubahan prioritas antara konsumsi energi dan kecepatan, yang sangat penting dalam situasi dinamis.

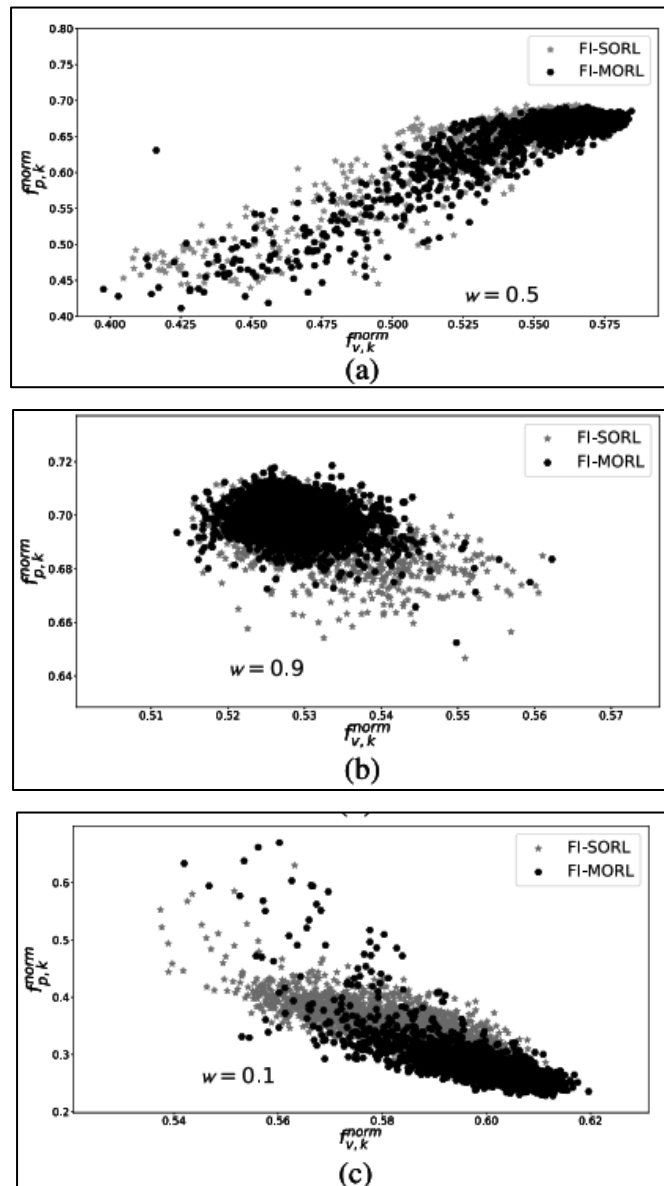
Proses Pembelajaran: Dalam algoritma ini, robot beroperasi dalam lingkungan yang tidak pasti, di mana ia memilih tindakan berdasarkan keadaan saat ini dan menerima umpan balik dalam bentuk reward. Proses ini diulang hingga robot mencapai kebijakan optimal yang memaksimalkan reward.

Perbandingan dengan Metode Lain: Jurnal ini juga membandingkan kinerja FI-MORL dengan algoritma pembelajaran penguatan tunggal dan metode tradisional lainnya, seperti proximal policy optimization dan deep Q-network. Hasil menunjukkan bahwa FI-MORL lebih efisien, dengan konsumsi daya yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi.

Kecepatan Konvergensi: FI-MORL menunjukkan kemampuan untuk berkonvergensi lebih cepat dan menangani perubahan bobot tujuan dengan lebih baik dibandingkan dengan metode lain. Ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diambil dalam pengembangan algoritma ini efektif dalam mencapai tujuan optimasi.

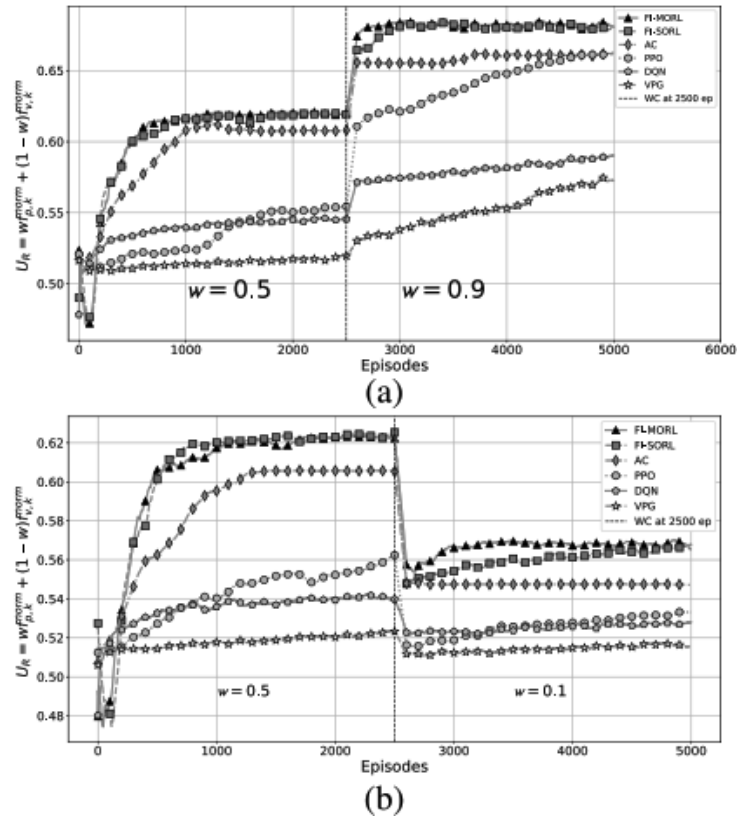
5. HASIL SIMULASI

Hasil simulasi yang disajikan dalam jurnal tersebut menunjukkan efektivitas algoritma FI-MORL (Fuzzy Inference Multiobjective Reinforcement Learning) dalam mengoptimalkan gerakan robot modular mirip ular (MR) dengan mempertimbangkan dua tujuan yang saling bertentangan: konsumsi energi dan kecepatan. Kami membandingkan metode yang diusulkan dengan FI-SORL dan algoritma SORL mendalam yang dijadikan acuan, yaitu jaringan Q mendalam (DQN) dan diperoleh grafik scatter plot sebagai berikut.



Gambar 2. Grafik sebar nilai objektif metode FI-MORL dan metode FI-SORL yang diusulkan: (a) kepentingan objektif yang sama dengan $w = 0.5$, (b) kepentingan objektif daya yang lebih tinggi dengan $w = 0.9$, dan (c) kepentingan objektif kecepatan yang lebih tinggi ketika $w = 0.1$.

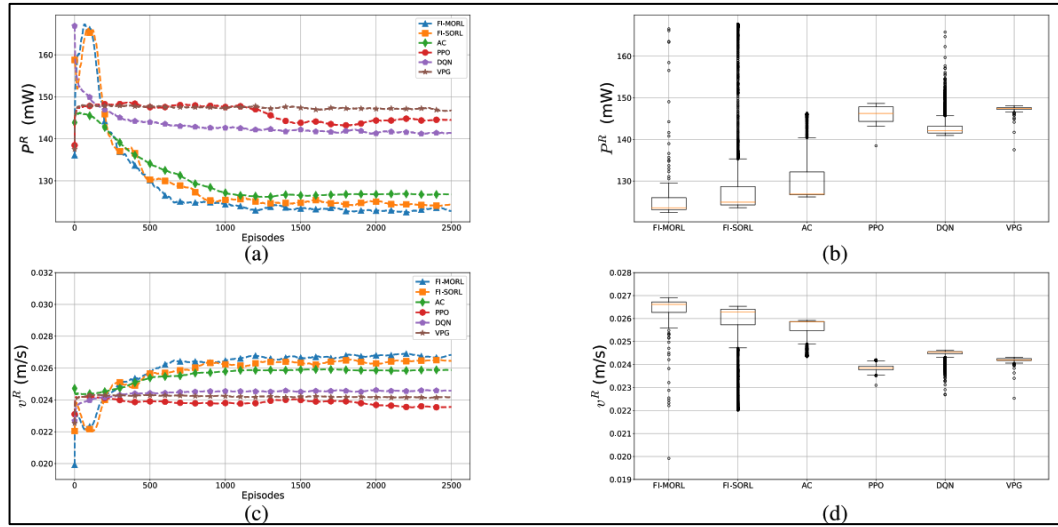
Metode lain menggunakan status kontinu yang berasal dari kecepatan sudut torsi setiap sambungan (juga digunakan untuk menghitung daya yang dikonsumsi oleh setiap sambungan dalam input sistem inferensi fuzzy) dan posisi sudut setiap sambungan. Pengaturan tindakan sama untuk semua metode.



Gambar 3. Perbandingan kurva pembelajaran sebelum dan sesudah perubahan bobot selama episode 2501: (a) dari tingkat kepentingan yang sama untuk kedua tujuan ke tingkat kepentingan yang lebih tinggi untuk tujuan daya dan (b) dari tingkat kepentingan yang sama untuk kedua tujuan ke tingkat kepentingan yang lebih tinggi untuk tujuan kecepatan.

Tabel 1. Nilai steady-state yang diperoleh dengan berbagai metode pembelajaran.

Average of last 100 episodes values after reaching steady-state for $w = 0.5$			
Method	Power Consumption P_R	Average Velocity v_R	Average Return U_R
FI-SORL	124.33 mW	0.0264 m/s	0.6181
FI-MORL	122.83 mW	0.0268 m/s	0.6189
DQN [37]	141.39 mW	0.0245 m/s	0.5458
PPO [38]	144.49 mW	0.0236 m/s	0.5538
AC [39]	126.76 mW	0.0259 m/s	0.6074
VPG [40]	147.71 mW	0.0241 m/s	0.5193



Gambar 3. (a), (b) Konsumsi daya dan (c), (d) kecepatan rata-rata MR Snake-like robot selama setiap putaran ketika w D 0:5.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa FI-MORL mengungguli algoritma pembelajaran penguatan tunggal (FI-SORL) dan metode pembelajaran penguatan berbasis deep learning lainnya. FI-MORL mampu mengurangi konsumsi daya rata-rata sebesar 2% dan meningkatkan kecepatan rata-rata sebesar 2.5% dibandingkan dengan FI-SORL. Selain itu, FI-MORL juga menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan mengonsumsi 14% lebih sedikit daya dan mencapai 11% kecepatan lebih tinggi dibandingkan dengan metode tradisional seperti proximal policy optimization, deep Q-network, dan vanilla policy gradient.

FI-MORL menunjukkan kemampuan untuk mencapai nilai steady-state (keseimbangan) lebih cepat setelah perubahan bobot tujuan. Dalam simulasi, ketika bobot tujuan diubah, FI-MORL dapat dengan cepat menyesuaikan diri dan mencapai keseimbangan antara konsumsi energi dan kecepatan, lebih cepat dibandingkan dengan metode lain yang diuji. Hasil menunjukkan bahwa FI-MORL dapat dengan cepat mencapai steady-state setelah perubahan bobot, yang menunjukkan fleksibilitas dan adaptabilitas algoritma dalam menghadapi perubahan prioritas antara konsumsi energi dan kecepatan.

FI-MORL juga menunjukkan peningkatan dalam reward yang diperoleh, dengan 14% lebih tinggi dibandingkan dengan metode lain setelah perubahan bobot. Ini menunjukkan bahwa algoritma tidak hanya efisien dalam hal konsumsi energi dan kecepatan, tetapi juga dalam hal pencapaian reward yang lebih baik.

6. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, kesimpulan dari jurnal ini menegaskan bahwa FI-MORL adalah pendekatan yang efektif dan efisien untuk mengoptimalkan gerakan robot modular mirip ular, dengan kemampuan untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan dalam tujuan dan prioritas.

REFERENSI

- [1] A. Singh, W. -Y. Chiu, S. H. Manoharan and A. M. Romanov, "Energy-Efficient Gait Optimization of Snake-Like Modular Robots by Using Multiobjective Reinforcement Learning and a Fuzzy Inference System," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 86624-86635, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3195928.
- keywords: {Robots;Mathematical models;Reinforcement learning;Optimization;Inference algorithms;Energy efficiency;Fuzzy logic;Energy efficiency;fuzzy inference system;gait optimization;modular robot;multiobjective reinforcement learning;snake-like modular robot},