

ABSTRAK

Disertasi ini membahas empat tantangan utama dalam penemuan persamaan dinamika robot manipulator: (1) ketidakefisienan dalam proses nonlinierisasi data, (2) ketidakmampuan persamaan yang teridentifikasi untuk menyesuaikan diri dengan bentuk matriks standar Lagrange-Euler, (3) kebutuhan akan akurasi dan ketahanan yang lebih baik dalam penemuan persamaan secara offline, dan (4) ketidakefisienan teknik yang ada saat ini pada penemuan persamaan secara online. Tantangan-tantangan ini menghambat keandalan dan aplikasi metode penemuan persamaan saat ini, sehingga memerlukan pendekatan baru untuk meningkatkan akurasi, sparsitas, dan efisiensi komputasi.

Untuk mengatasi beberapa tantangan tersebut, studi ini mengusulkan beberapa algoritma. Algoritma *Dynamic Expression Nonlinearization* (DEX-N) diusulkan untuk meningkatkan teknik nonlinierisasi data, memastikan bahwa data input diubah secara tepat berdasarkan dinamika robot manipulator. Algoritma *Variable Segregation* diusulkan untuk memecah persamaan dinamik menjadi komponen inersia, Coriolis-sentrifugal, dan gravitasi, sehingga menghasilkan model yang lebih terstruktur dan dapat diinterpretasikan untuk aplikasi selanjutnya. *LASSO Model Selection Criteria* (LMSC) dirancang untuk meningkatkan akurasi dan sparsitas dalam penemuan persamaan secara offline dengan memilih istilah yang paling relevan secara sistematis sekaligus meminimalkan *overfitting*. Untuk penemuan persamaan secara online, *Recursive Sparse Identification of Nonlinear Dynamics* (R-SINDy) diusulkan untuk memungkinkan identifikasi secara online dengan kinerja komputasi yang efisien.

Hasil eksperimen menunjukkan efektivitas metode-metode ini pada berbagai sistem robotik, termasuk model robot simulasi, serta robot manipulator ROB3 dan KUKA 3-DoF. Algoritma DEX-N mampu mengurangi jumlah fitur data nonlinier dari 639 menjadi 279, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses regresi. Algoritma *Variable Segregation* berhasil menghasilkan persamaan dinamik dalam bentuk matriks D, H, dan G, hal ini memungkinkan pemanfaatan lebih lanjut dari persamaan tersebut dalam berbagai aplikasi. LMSC mampu meningkatkan akurasi identifikasi offline untuk robot manipulator berbasis perangkat keras serta memberikan sparsitas koefisien dan ketahanan yang lebih baik. Algoritma ini mencapai hingga 92,85% sparsitas dan 79,5% akurasi prediksi pada dataset uji, menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan pendekatan sebelumnya, dan lebih cocok untuk aplikasi robotik. Untuk identifikasi secara online, R-SINDy mencapai akurasi hingga 94,90% dan mampu beradaptasi secara efisien terhadap variasi parameter. Selain itu, R-SINDy mampu memproses data dengan kecepatan tinggi, dengan rata-rata waktu komputasi sebesar 0,006 detik. Secara keseluruhan, hasil ini memberikan peningkatan signifikan dalam akurasi, kelangkaan, dan efisiensi komputasi, yang dapat dimanfaatkan pada aplikasi seperti pemantauan online, kontrol adaptif, dan deteksi kesalahan pada sistem robotik.

Keywords—equation discovery, dynamic system, robot manipulators, nonlinearization, system identification, SINDy, Recursive.

ABSTRACT

This dissertation addresses four major challenges in the equation discovery of robot manipulator dynamics: (1) inefficiencies in data nonlinearization, (2) the inability of identified equations to conform to the standard Lagrange-Euler matrix form, (3) the need for improved accuracy and robustness in offline equation discovery, and (4) the inefficiency of existing online equation discovery techniques. These challenges hinder the reliability and applicability of current equation discovery methods, necessitating novel approaches to enhance accuracy, sparsity, and computational efficiency.

To address these challenges, this study proposes several advanced algorithms. The Dynamic Expression Nonlinearization (DEX-N) algorithm is introduced to improve the data nonlinearization technique, ensuring that the input data are properly transformed based on the robot manipulator's dynamics. The Variable Segregation Algorithm is developed to decompose dynamic equations into inertia, coriolis-centrifugal, and gravitational components, enabling better structured and interpretable models for further applications. The LASSO Model Selection Criteria (LMSC) is designed to enhance the accuracy and sparsity of offline equation discovery by systematically selecting the most relevant terms while minimizing overfitting. For online equation discovery, Recursive Sparse Identification of Nonlinear Dynamics (R-SINDy) is proposed to enable online sparse identification with efficient computational performance.

The experimental results validate the effectiveness of these methods across multiple robotic systems, including a simulated robot model, and ROB3 and KUKA 3-DoF robot manipulators. The DEX-N algorithm reduces the number of nonlinearized data features from 639 to 279 features, improving the efficiency of the regression processes. The Variable Segregation Algorithm successfully produces dynamic equations in D, H, and G matrix forms, allowing further utilization of the resulting equations in various applications. The LMSC enhances the accuracy of offline identification for hardware-based robotic manipulators and provides enhanced sparsity and robustness. It achieves up to 92.85% sparsity and 79.5% prediction accuracy on test datasets, demonstrating superior performance compared to previous approaches, making it suitable for robotic applications. For online identification, R-SINDy achieved up to 94.90% accuracy in regression tasks and is efficiently adapted to parameter variations. In addition, R-SINDy is capable of processing at a relatively high speed, achieving an average computation time of 0.006 seconds. Overall, these advancements offer substantial improvements in accuracy, sparsity, and computational efficiency, with potential applications in online monitoring, adaptive control, and fault detection in robotic systems.

Keywords—equation discovery, dynamic system, robot manipulators, nonlinearization, system identification, SINDy, Recursive.