

Zusammenfassung

Datengetriebene Modelle zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern

Die weitreichende Nutzung von Industrierobotern für Fertigungsverfahren wie dem Fräsen, Umformen oder der additiven Fertigung ist weiterhin durch deren limitierte statische und dynamische Genauigkeit beschränkt. Modellbasierte Methoden zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern stoßen nach aktuellem Stand der Technik aufgrund vereinfachender Annahmen, Nichtlinearitäten sowie Parameterabhängigkeiten an ihre Grenzen. Die zunehmende Integration von Sensorik sowie die Vernetzung von Produktionssystemen eröffnet darüber hinaus Potenziale für die datengetriebene Modellierung des Genauigkeitsverhaltens von Industrierobotern im Sinne des maschinellen Lernens, welche bis dato nur unzureichend genutzt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden datengetriebene Modelle durch grundlegende Untersuchungen von Modelltopologien, die Identifikation von Wirkzusammenhängen sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern befähigt. Die Handlungsempfehlungen beziehen sich auf die Wahl des Regressionsalgorithmus, die Wahl der Eingangs-, Ausgangs- sowie Hyperparameter, die Anzahl der Modellfreiheitsgrade sowie die Anzahl der zu verwendenden Trainingsdaten. Es werden Methoden zur automatisierten Datengenerierung, zur Vorhersage von Konfidenzen, zum kontinuierlichen Modelltraining sowie zur Integration der datengetriebenen Modelle in eine Offline- und Online-Kompensation vorgestellt.

Bei experimentellen Validierungsversuchen wird eine Genauigkeitssteigerung des betrachteten Industrieroboters durch die datengetriebenen Modelle von teilweise deutlich über 90 % nachgewiesen. Berücksichtigt werden hierbei die an- und abtriebsseitigen Gelenkwinkel, die Raumtemperatur sowie die Temperaturverteilung entlang der Roboterstruktur. Die datengetriebenen Modelle zeigen außerdem eine hohe Generalisierbarkeit, was sich in einer Homogenisierung der Pose-Genauigkeit im gesamten Arbeitsraum äußert.

Insgesamt ermöglichen die vorgestellten Methoden, die gewonnenen Erkenntnisse sowie die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen eine Erweiterung der Einsatzgrenzen von Industrierobotern durch die datengetriebene Genauigkeitssteigerung.

Abstract

Data-driven models to increase the accuracy of industrial robots

The widespread application of industrial robots in manufacturing processes such as milling, forming, or additive manufacturing remains limited due to their constrained static and dynamic accuracy. Model-based approaches to enhance the accuracy of industrial robots face inherent limitations stemming from simplifying assumptions, nonlinearities, and parameter dependencies. The increasing integration of sensors and the networking of production systems open up new potential for data-driven modelling of robot accuracy behaviour through machine learning, which has so far been insufficiently exploited.

This study aims to enable data-driven models by conducting fundamental investigations into model topologies, identifying relevant cause-effect relationships, and deriving actionable recommendations for improving the accuracy of industrial robots. These recommendations address the selection of regression algorithms, input and output variables, hyperparameters, the degrees of freedom of the model, and the required amount of training data. Furthermore, the study presents methods for automated data generation, confidence prediction, continuous model training, and the integration of data-driven models into both offline and online compensation strategies.

Experimental validation demonstrates that the proposed data-driven models can increase the accuracy of the examined industrial robot by well over 90 %. This improvement considers both motor- and load-side joint angles, ambient temperature, and the temperature distribution along the robot structure. In addition, the models exhibit high generalisability, which manifests as a homogenisation of pose accuracy throughout the robot's entire workspace.

Overall, the methods, insights, and recommendations developed in this work pave the way for expanding the application boundaries of industrial robots through data-driven accuracy enhancement.