

Streszczenie

Wzrost zastosowań autonomicznych robotów mobilnych (AMR) w intralogistyce uwidacznia ograniczenia współczesnych systemów flotowych, które nie dysponują wiarygodnymi narzędziami do prognozowania zużycia energii. Decyzje operacyjne opierają się głównie na procentowym poziomie naładowania akumulatora, co utrudnia ocenę wykonalności misji i prowadzi do nadmiarowego powiększania flot. Dotychczasowe badania koncentrowały się na robotach prototypowych, oferujących pełny dostęp do danych, co czyni je nieprzydatnymi dla komercyjnych platform o ograniczonej obserwowalności.

Celem głównym pracy było opracowanie i weryfikacja modelu predykcyjnego zużycia energii dla komercyjnego AMR, umożliwiającego ocenę wykonalności misji oraz wsparcie decyzji operacyjnych. Cele szczegółowe obejmowały identyfikację czynników wpływających na pobór energii, opracowanie metodyki pozyskiwania danych, przygotowanie procedury eksperymentalnej oraz konstrukcję modeli predykcyjnych o różnym stopniu złożoności. W pracy zaproponowano kompletną metodykę badawczą obejmującą klasyfikację czynników energetycznych, selekcję dostępnych predyktorów oraz dwustopniowy plan eksperymentów DoE. Zbudowano stanowisko pomiarowe, które umożliwiło równoczesną rejestrację parametrów misji, danych systemowych i logów energetycznych dla różnych obciążeń, dystansów oraz dwóch akumulatorów o odmiennym stopniu zużycia.

Na podstawie zgromadzonych danych opracowano trzy modele predykcyjne: prosty model jednowymiarowy M1, model GLM (M2) oraz model M3 zbudowany za pomocą narzędzia AutoML. Walidacja wykazała, że modele wieloparametryczne znacznie przewyższają M1 pod względem dokładności i uniwersalności. Najwyższą dokładność osiągnięto dla M3 (AR-S do 0,982), natomiast największą transparentność zapewnił model M2. Wskazano także trzy główne predyktory zużycia energii: liczbę zakrętów, SoC na początku misji i długość trasy. Wyniki potwierdzają możliwość skutecznego modelowania zużycia energii w komercyjnych AMR mimo ograniczonego dostępu do danych. Metodyka może być rozszerzana na inne platformy, rozbudowana o uczenie przyrostowe i zintegrowana z systemami FMS oraz cyfrowymi bliźniakami.

Abstract

The growing usage of Autonomous Mobile Robots (AMR) in intralogistics highlights the limitations of current fleet management systems, which lack reliable tools for predicting energy consumption. Operational decisions are typically based on the battery State of Charge reported as a percentage, making it difficult to assess mission feasibility and often leading to oversizing of robot fleets. Existing research has mainly focused on prototype robots with full access to control and hardware data, rendering those approaches unsuitable for commercial platforms with restricted observability.

The main objective of this work was to develop and validate a predictive energy consumption model for a commercial AMR, enabling mission feasibility assessment and supporting operational decision-making. The specific objectives included identifying the factors influencing energy usage, designing a data acquisition methodology, preparing an experimental procedure, and constructing predictive models of varying complexity. The study proposes a complete research framework that encompasses the classification of energy-related factors, the selection of measurable predictors, and a two-stage Design of Experiments (DoE) plan. A dedicated measurement setup was developed to collect mission parameters, system data, and energy logs simultaneously for various loads, distances, and two batteries with different levels of degradation.

Based on the collected dataset, three predictive models were developed: a simple univariate model (M1), a Generalized Linear Model (M2), and a model built using AutoML (M3). Validation showed that the multiparametric models significantly outperformed M1 in terms of accuracy and generalizability. The highest accuracy was achieved by M3 (AR-S up to 0.982), while M2 offered the greatest transparency. Three key predictors of energy consumption were identified: the number of turns, initial State of Charge, and travel distance. The results confirm that effective energy prediction is feasible for commercial AMRs despite limited system-level data availability. The proposed methodology can be extended to other robot platforms, enhanced with incremental learning, and integrated with Fleet Management Systems and digital twin environments.