АНОТАЦІЯ

Мазуренко Р.В. **Інтелектуальна система керування трафіком великого міста.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». – Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2024.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що:

вперше розроблено:

– інтелектуальну модель керування транспортними потоками м. Києва, що використовує результати симуляційних експериментів на моделі дорожньої мережі міста за сценарієм руху з урахуванням точок інтересу;

удосконалено:

– архітектуру розподіленої високонавантаженої інтелектуальної системи керування трафіком міста, яка на відміну від існуючих, навчається оптимізувати трафік шляхом вибору кращого рішення з множини прийнятних альтернатив, виконуючи моделювання транспортних потоків мережею доріг цього міста;

– технологію проєктування систем керування трафіком великого міста в напрямку підвищення надійності і швидкості навчання моделі за рахунок закладання в основу моделювання реальних умов руху;

набули подальшого розвитку:

– понятійний апарат концепту онтологій «Транспортний потік» за рахунок наближення моделі середовища до реальних умов та надання агентам семантичного розуміння моделі середовища;

– мультиагентний підхід навчання з підкріпленням для керування трафіком в напрямку пришвидшення навчання моделей штучного інтелекту шляхом використання результатів симуляційних експериментів, застосування онтології для повторного використання знань і запуску нечітких правил керування світлофорами в реальних умовах;

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-практичної проблеми розумного керування трафіком великого міста. Головна ідея роботи полягає в створенні моделі системи, яка складається з модулів, кожен з яких має декілька альтернативних способів реалізації, що дає додаткову гнучкість на етапі впровадження. Таким чином ця робота фокусується на отриманні практичної цінності від запропонованих ідей та зважає на вартість, швидкість та простоту впровадження в реальних умовах, що у воєнний час є особливо актуальним для бюджетів міст та областей України. Запропоновані підходи дозволяють пришвидшити навчання моделі прийняття рішень, якою керуються інтелектуальні агенти при керуванні комплексом світлофорів.

За результатами дослідження розроблено:

– інтелектуальну модель керування комплексом світлофорів великого міста, в основі якої лежить мультиагентний підхід навчання з підкріпленням;

– програмно-технічний комплекс для адаптивного керування світлофорами міста Києва на рівні вулиць.

У першому розділі сформовано комплексне розуміння проблем дорожнього руху, що пов’язані з транспортними заторами у великих містах; досліджено підходи до вирішення проблеми заторів та методи моделювання трафіку великого міста; проведено всебічний огляд існуючих інформаційних та інтелектуальних систем керування трафіком; показано значення моделей і методів штучного інтелекту в процесі аналізу даних, оптимізації маршрутів і

керування світлофорами в режимі реального часу; з’ясовано, що при проєктуванні інтелектуальних систем керування трафіком великого міста необхідно враховувати такі риси середовища, як стан мережі доріг, вплив розташування точок інтересу на формування маршрутів користувачів транспортними засобами і транспортних потоків, часткова спостережуваність і стохастичність; окреслено обмеження щодо використання навчання з підкріпленням в інтелектуальних системах керування світлофорами; виконано постановку задачі.

У другому розділі запропоновано концептуальну модель інтелектуальної системи керування трафіком великого міста; окреслено напрям формування гібридних моделей керування трафіком; формалізовано і структуровано базові поняття домену «Дорожній рух»; для надання агентам контролерів світлофорів семантичного розуміння моделі середовища; концепт «Транспортний потік» розширено в напрямку наближення моделі середовища до реального аналога шляхом доповнення набору вхідних даних, які є значущими для забезпечення надійного моделювання трафіку великого міста при реалізації можливості руху до об’єктів інтересу альтернативними маршрутами; формалізовано уніфіковану модель складного чотиристороннього перехрестя, прилеглих доріг і множини змінних, що використовуються при моделюванні роботи комплексу світлофорів на цьому перехресті; обґрунтовано застосування автомата Мура для керування комплексом світлофорів в умовах невизначеності, що пов'язана з вибором кращого рішення з множини прийнятних альтернатив; виконано кодування внутрішніх станів і функцій виходів автомата; структуровано і формалізовано основні поняття концепту «Моделі рішень» онтології системи і надано розуміння можливості різних моделей і методів штучного інтелекту, здатних вирішувати різні задачі покращення дорожнього руху великого міста.

У третьому розділі розглянуто архітектуру інтелектуальної системи керування трафіком великого міста; на основі аналізу ключових компонентів і функцій системи підібрано взаємопов'язані одиниці, які здатні спільно керувати транспортними потоками міста; обґрунтовано доцільність застосування в системі нереляційної бази даних архітектури Касандра; описано ядро інтелектуальної системи керування трафіком великого міста – модель прийняття рішень; проаналізовано потенціал алгоритмів, які доцільно використовувати при вирішенні задач інтелектуального керування комплексом світлофорів; обґрунтовано вибір навчання з підкріпленням; надано математичну основу навчання з підкріпленням, що необхідна для розуміння внутрішньої роботи системи керування трафіком міста; показано можливість спілкування агентів контролерів світлофорів шляхом обміну простих і зрозумілих повідомлень на основі даних щодо стану руху на певному перехресті і прохідності сусідніх перехресть: детально описано процес формування повідомлень, синхронізації роботи світлофорів і здатність моделі прийняття рішень до адаптації за рахунок застосування навчання з підкріпленням.

У четвертому розділі розглянуто програмні пакети, що розроблені для моделювання міського і регіонального трафіку; обґрунтовано вибір програмного пакета Simulation of Urban Mobility для моделювання дорожнього руху; покроково описано процес створення моделі дорожньої мережі, запуску симуляції і формування набору даних для навчання з підкріпленням, яке покладено в основу керування комплексом світлофорів; процес моделювання транспортних потоків з урахуванням точок інтересу описано на прикладі м. Києва; на основі експериментальних досліджень сформовано навчальне середовище для моделі керування світлофорами за алгоритмами Q-learning, Deep Q-Network, Proximal Policy Optimization і True Online Temporal-Difference

Learning; виконано тренування і порівняльний аналіз результатів навчання; для подальшого практичного впровадження в програмно-технічний комплекс спостереження за станом руху і адаптивного керування світлофорами на складних перехрестях за результатами досліджень рекомендовано інтелектуальну модель керування комплексом світлофорів, навчену за алгоритмом True Online Temporal-Difference Learning; надано інструкцію щодо впровадження системи в дорожню інфраструктуру міста.

Ключові слова: інформаційна система, модель прийняття рішень, машинне навчання, нейронна мережа, об'єкт онтології, розумне місто, симуляційний експеримент, транспортний потік, управління трафіком, формалізація, штучний інтелект.

ABSTRACT

Mazurenko R. Intelligent traffic control management system of a big city. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 "Information systems and technologies". - Kyiv National University of Construction and Architecture. - Kyiv, 2024.

The scientific novelty of the obtained results. The scientific novelty of the dissertation is that:

first developed:

– the intelligent model of traffic flow management in Kyiv, which uses the results of simulation experiments on the model of the city's road network according to the traffic scenario, taking into account points of interest;

improved:

– the architecture of a distributed highly loaded intelligent traffic management system of the city, which, unlike the existing ones, learns to optimize traffic by choosing the best solution from a set of acceptable alternatives, performing simulation of traffic flows through the road network of this city;

- the technology of designing traffic management systems of a large city in the direction of increasing the reliability and speed of learning the model due to the basis of modeling real traffic conditions;

acquired further development:

– the conceptual apparatus of the concept of "Transport flow" ontologies by bringing the environment model closer to real conditions and providing controller agents with a semantic understanding of the environment model;

– a multi-agent reinforcement learning approach for traffic management towards accelerating the learning of artificial intelligence models by using the results of simulation experiments, applying ontology for knowledge reuse, and running fuzzy traffic light control rules in real conditions.

The main content of the dissertation

The dissertation is devoted to solving the important scientific and practical problem of smart traffic management in a big city. The main idea of the work is to create a model of the system, which consists of modules, each of which has several alternative ways of implementation, which gives additional flexibility at the implementation stage. Thus, this work focuses on obtaining practical value from the proposed ideas and takes into account the cost, speed, and ease of implementation in real conditions, which in wartime is especially relevant for the budgets of cities and regions of Ukraine. The proposed approaches make it possible to speed up the learning of the decision-making model, which is controlled by intelligent agents when controlling a complex of traffic lights.

Based on the results of the study, the following was developed:

– the intelligent model for managing a complex of traffic lights in a big city, which is based on a multi-agent approach of reinforcement learning;

– software and technical complex for adaptive control of traffic lights of the city of Kyiv at the street level.

In the first chapter, a comprehensive understanding of traffic problems related to traffic jams in large cities is formed; approaches to solving the problem of traffic jams and methods of modeling the traffic of a big city were investigated; a comprehensive review of existing information and intelligent traffic management systems was conducted; the importance of artificial intelligence models and methods in the process of data analysis, route optimization and traffic light management in

real time is shown; it was found that when designing intelligent traffic management systems of a large city, it is necessary to take into account such features of the environment as the state of the road network, the influence of the location of points of interest on the formation of user routes by vehicles and traffic flows, partial observability and stochasticity; limitations on the use of reinforcement learning in intelligent traffic light control systems are outlined; the statement of the problem is completed.

In the second chapter, the conceptual model of the intelligent traffic management system of a large city is proposed; the direction of formation of hybrid models of traffic management is outlined; formalized and structured the basic concepts of the "Road Traffic" domain; to provide traffic light controller agents with a semantic understanding of the environment model; the "Transport flow" concept has been expanded in the direction of bringing the environment model closer to a real analogue by adding a set of input data that are significant for ensuring reliable traffic modeling of a large city when realizing the possibility of moving to objects of interest by alternative routes; formalized a unified model of a complex four-way intersection, adjacent roads and a set of variables used in modeling the operation of the traffic light complex at this intersection; the application of Moore's automaton for controlling a set of traffic lights in conditions of uncertainty related to the choice of the best solution from a set of acceptable alternatives is substantiated; the coding of the internal states and functions of the automatic machine outputs was performed; the basic concepts of the "Solution Models" concept of the system ontology are structured and formalized, and an understanding of the possibility of various models and methods of artificial intelligence, capable of solving various problems of improving traffic in a large city, is provided.

The third chapter examines the architecture of the intelligent traffic management system of a large city; based on the analysis of the key components and functions of the system, interconnected units are selected that are able to jointly manage the city's traffic flows; the expediency of using the non-relational database of the Cassandra architecture in the system is substantiated; the core of the intelligent traffic management system of a big city is described - a decision-making model; the potential of algorithms, which are expedient to use when solving problems of intelligent control of a set of traffic lights, is analyzed; the choice of training with reinforcement is justified; provided a mathematical basis for reinforcement learning, which is necessary for understanding the inner workings of the city's traffic management system; the possibility of communication between agents of traffic light controllers by exchanging simple and understandable messages based on data about the state of traffic at a certain intersection and the passability of neighbouring intersections is shown: the process of generating messages, synchronizing the operation of traffic lights and the ability of the decision-making model to adapt due to the application of reinforcement learning are described in detail.

The fourth chapter deals with software packages developed for modeling city and regional traffic; the choice of the Simulation of Urban Mobility software package for traffic simulation is justified; step-by-step description of the process of creating a road network model, starting a simulation and forming a data set for reinforcement learning, which is the basis for controlling a set of traffic lights; the process of modeling traffic flows taking into account points of interest is described on the example of the city of Kyiv; on the basis of experimental studies, a training and test sample was formed for learning the traffic light control model using the Q-learning, Deep Q-Network, Proximal Policy Optimization and True Online Temporal-Difference Learning algorithms; training and comparative analysis of

training results were performed; for further practical implementation into the software and technical complex of traffic monitoring and adaptive control of traffic lights at complex intersections, based on the results of research, an intelligent model of control of the complex of traffic lights, trained according to the True Online Temporal-Difference Learning algorithm, is recommended; instructions were given on the implementation of the system in the road infrastructure of the city.

Keywords: information system, decision-making model, machine learning, neural network, ontology object, smart city, simulation experiment, traffic flow, traffic management, formalization, artificial intelligence.