

АНОТАЦІЯ

Іванюк О. І. Модель та метод інформаційної технології навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливого наукового завдання з розробки моделі та методу інформаційної технології навігації автономних мобільних систем (АМС), що забезпечує однорідну інтеграцію таких чотирьох завдань навігаційного циклу, як сприйняття інформації, локалізація, динамічне планування маршруту та ситуаційне керування рухом у недетермінованому частково спостережуваному оточенні.

Частини досліджень, результати яких викладено в дисертації, виконано в межах науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту «Розумні машини та інтернет речі зі штучним інтелектом», № ДР 0120U104276 та держбюджетної науково-дослідної роботи Харківського національного університету радіоелектроніки «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403.

Об'єкт дослідження: процес навігації автономних мобільних систем.

Предмет дослідження: моделі, методи і технології навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності, неповноти та нечіткості інформації.

Метою дисертаційного дослідження є розширення можливостей навігації мобільних систем в автономному режимі в умовах частково недетермінованого оточення.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі завдання дослідження:

1) проведено аналіз існуючих моделей та методів навігації, що використовуються в автономних мобільних системах;

2) розроблено модель ситуаційного управління переміщенням по маршруту автономної мобільної системи в умовах передбачених збурень на основі концептуальної моделі сприйняття з механізмами управління контекстом і переключення уваги;

3) розроблено модель та метод ситуаційного управління переміщенням по маршруту з динамічним переплануванням маршруту автономної мобільної системи в умовах непередбачених збурень;

4) розвинуто інформаційну технологію навігації автономної мобільної системи на основі моделі ситуаційного управління переміщенням та динамічного перепланування;

5) проведено комплексне тестування розроблених моделі, методу та інформаційної технології.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в такому:

– уперше розроблено модель ситуаційного управління переміщенням автономної мобільної системи з переплануванням маршруту, яка, на відміну від існуючих, враховує вплив заздалегідь непередбачених збурень, що унеможливають переміщення до цільової позиції маршруту, та завдяки ситуаційному переплануванню на підставі сенсорних даних про поточну ситуацію дозволяє автономній мобільній системі досягнути цілі;

– удосконалено метод ситуаційного управління з урахуванням контексту, який адаптовано до завдання управління переміщенням автономної мобільної системи вздовж заданого маршруту, що дозволяє на цій підставі вирішувати завдання навігації мобільних автономних систем в умовах невизначеності й неповної інформації;

– забезпечено подальший розвиток інформаційної технології навігації автономної мобільної системи за рахунок використання моделі та методу ситуаційного управління з переплануванням маршруту, що дозволяє розширити застосування автономних мобільних систем в автономному режимі у частково

недетермінованому оточені, коли відсутня можливість або економічно необґрунтоване упорядкування оточення.

Практичне значення отриманих теоретичних результатів полягає у тому, що запропоновані у роботі модель і метод ситуаційного управління з переплануванням маршруту автономної мобільної системи є універсальним засобом, який може використовуватись у завданнях управління розумними машинами широкого класу. Фрагменти дисертаційної роботи запроваджено: в процесі виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403; у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту.

У *першому розділі* проведено аналіз функціонального навантаження, сфер застосування та перспектив використання автономних мобільних систем. Розглянуто відомі підходи до вирішення завдання навігації АМС. Висвітлено сутність завдань, що формують навігаційний цикл: сприйняття інформації про оточення, локалізація та картографування, планування маршруту, керування рухом. Проаналізовано відомі моделі та методи вирішення цих завдань. Розкрито сутність підходу ситуаційного управління, його переваги та досвід застосування в інших предметних галузях. На підставі наведеного аналізу зроблено висновки щодо факторів, які накладають обмеження на використання методів і моделей навігації в автономних мобільних системах. Тобто в умовах недетермінованості й обмеженого спостереження за оточенням потрібні методи автоматичного перепланування маршруту, що інтегровані з моделями сприйняття даних від сенсорів і ситуаційним управлінням.

У *другому розділі* викладено застосування підходу ситуаційного управління з урахуванням контексту до завдання навігації автономних мобільних систем. На основі відомого підходу ситуаційного управління запропоновано модель управління переміщенням АМС. Для цього виконано стратифікацію бази знань АМС за рівнями абстрагування. Однорідність інтеграції рішень завдань, які виникають на різних етапах навігаційного циклу,

досягнуто за рахунок використання однакової для всіх рівнів моделі представлення знань, а саме нечітких правил, що обробляються за допомогою механізму виведення модифікованої нечіткої моделі Такагі-Сугено-Канга. Наведено метод представлення у вигляді нечітких правил Такагі-Сугено-Канга для п'яти рівнів бази знань: знання, що описують цілі АМС; знання про план досягнення цілі; картографічні знання; знання про стратегії руху в ключових точках робочого простору та між ними; знання про стратегії керування рухом.

Наведено комп'ютерні експерименти з розробленою моделлю. Результати експериментів показали, що модель забезпечує успішне виконання завдання переміщення АМС уздовж заздалегідь запланованого маршруту без перешкод; переміщення, коли в пам'яті АМС міститься декілька маршрутів, зокрема й таких, що мають спільні ділянки, при цьому колізії не виникають; переміщення АМС уздовж маршруту, коли збурення, що пов'язані з обмеженнями спостереження оточення, ускладнюють вирішення завдання локалізації. Ці збурення долаються шляхом узагальнення ситуації, що виконується механізмом виведення нечіткої моделі Такагі-Сугено-Канга.

У *третьому розділі* розроблено метод ситуаційного управління автономною мобільною системою з переплануванням маршруту, що забезпечує виконання завдань АМС в умовах непередбачених перешкод. Запропонований метод використовує знання АМС про відомі фрагменти маршрутів для синтезу нових маршрутів руху з метою забезпечення досягнення цілі в умовах зміни оточення.

У *четвертому розділі* запропоновано розвиток інформаційної технології навігації АМС на основі моделі управління та методу перепланування, наведених у розділах 2 та 3. Запропоновано структуру програмного забезпечення бортової системи АМС, що підтримує інформаційну технологію її навігації. Структура складається з п'яти модулів, три з яких базуються на моделі, розробленій у цій роботі.

Інформаційна технологія використана для проведення натурних експериментів. У ході експериментів здійснювалось варіювання повноти бази

маршрутів АМС та динамічно додавались перешкоди в оточенні, що унеможлилювали рух за відомими (або автономно побудованими при отриманні цілі руху) маршрутами. Метою експериментів було проведення комплексного тестування пропонованої інформаційної технології щодо можливості її застосування для вирішення завдання моніторингу просторово розосереджених об'єктів. За результатами експериментів було встановлено придатність пропонованої системи для умов, коли досяжність цільової точки руху є принципово можливою, враховуючи наявні знання, тобто АМС здатна обрати або самостійно побудувати маршрут в умовах появи динамічних перешкод, що поєднує поточне місцезнаходження АМС із цільовим. Якщо принципове досягнення цільової точки неможливе через недостатній обсяг поточних знань, АМС здатна переходити у режим випадкового руху, який дозволяє здійснити поповнення поточної бази знань.

Результати дисертаційних досліджень викладено у 17 наукових працях автора, а саме: 4 наукові статті в періодичних виданнях, з яких 3 статті у виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б», 1 стаття у закордонному періодичному науковому виданні (Болгарія); 1 розділ у колективній монографії, виданій за кордоном (Швейцарія); 12 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, серед яких 1 доповідь опублікована в матеріалах міжнародної наукової конференції, що індексується наукометричною базою Scopus.

Ключові слова: автономна мобільна система, навігація, ситуаційне управління, технології штучного інтелекту, когнітивна робототехніка, системи, засновані на правилах, нечітка обробка інформації, інтеграція цифрових рішень, навчання з підкріпленням.

ABSTRACT

Ivaniuk O. I. Model and method of information technology of navigation of autonomous mobile systems under conditions of uncertainty. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy is specialty 126 – Information Systems and Technologies. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2021.

The thesis is devoted to the solution of an important scientific problem on the development of a model and method of the information technology of navigation of an autonomous mobile system (AMS), which provides homogeneous integration of four navigation cycle tasks such as information perception, localization, dynamic path planning and situational motion control in an indeterminate partially observed environment.

Parts of the research, the results of which are presented in the thesis, were performed within the research work of the Ukrainian State University of Railway Transport "Smart machines and the Internet of Things with artificial intelligence", № DR 0120U104276 and the state-funded research work of the Kharkiv National University of Radio Electronics "Deep hybrid systems of computational intelligence for data streams analysis and their fast learning", № DR 0119U001403.

The research object is the process of navigation of autonomous mobile systems.

The research subject encompasses models, methods and technologies of navigation of autonomous mobile systems in the conditions of uncertainty, incompleteness and fuzzies of information.

The research aim is to expand the possibilities of navigation of mobile systems in the autonomous mode in a partially indeterminate environment.

To achieve the research aim the following research tasks have been solved:

1) an analysis of existing models and methods of navigation used in autonomous mobile systems has been carried out;

2) a model of situational control of movement on a path of an autonomous mobile system in the conditions of the provided disturbances based on the perception conceptual model with mechanisms of context management and attention switching has been developed;

3) a model and method of situational control of movement on a path with dynamic re-planning of a path of an autonomous mobile system in the conditions of unforeseen disturbances have been developed;

4) the information technology of navigation of an autonomous mobile system based on the model of situational control of movement and dynamic re-planning has been developed;

5) comprehensive testing of the developed model, method and information technology has been carried out.

The scientific novelty of the thesis is as follows:

– for the first time, a model of situational control of an autonomous mobile system movement with re-planning of a path has been developed, which, unlike others, takes into account the impact of unforeseen disturbances that make it impossible to move to the goal position of the path, and due to situational re-planning based on sensory data about the current situation allows an autonomous mobile system to achieve the goal;

– the context-sensitive method of situational control has been improved, which is adapted to the task of controlling the movement of an autonomous mobile system along a given path, which allows on this basis to solve the problem of navigation of mobile autonomous systems in conditions of uncertainty and incomplete information;

– the further development received the information technology of navigation of an autonomous mobile system using the model and method of situational control with re-planning of the path, which allows to expand the use autonomous mobile systems in a partially indeterminate environment, when there is no possibility or economically unreasonable a streamlining of the environment.

The practical significance of the obtained theoretical results of the thesis is that the proposed model and method of situational control with re-planning of the path of

an autonomous mobile system is a universal tool that can be used in the control of smart machines of a wide class. Fragments of the thesis were introduced: in the process of performing state-funded research work "Deep hybrid systems of computational intelligence for data streams analysis and their fast learning", № DR 0119U001403; in the educational process of the Ukrainian State University of Railway Transport.

In Chapter One, the analysis of functional loading, spheres of application and prospects of use of autonomous mobile systems is carried out. Known approaches to solving the problem of an AMS navigation are considered. The essence of the tasks that form the navigation cycle is highlighted: perception of information about the environment, localization and mapping, path planning, motion control. Known models and methods of solving these problems are analyzed. The essence of the situational control approach, its advantages and experience in other subject areas are revealed. Based on the above analysis, conclusions are drawn on the factors that impose restrictions on the use of methods and models of navigation in autonomous mobile systems. That is, in conditions of nondeterministic and limited observation of the environment requires methods of automatic re-planning of the path, integrated with models of data perception from sensors and the situational control.

In Chapter Two, the application of the context-sensitive situational control approach to the task of navigation of autonomous mobile systems is stated. Based on the known approach of situational control, a model of an AMS movement control is proposed. For this purpose, an AMS knowledge base was stratified according to the levels of abstraction. The homogeneity of the integration of solutions to tasks that arise at different stages of the navigation cycle is achieved through the use of the same for all levels of the model of knowledge representation, namely fuzzy rules that processed by the inference mechanism of the modified Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model. A method of representation in the form of fuzzy Takagi-Sugeno-Kang rules for five levels of the knowledge base is given: knowledge describing the goals of an AMS; knowledge of the plan to achieve the goal; cartographic knowledge; knowledge of movement strategies at key points in the workspace and between them; knowledge of motion control strategies.

Computer experiments with the developed model are given. The results of the experiments showed that the model ensures the successful completion of the task of moving an AMS along a pre-planned path without obstacles; moving an AMS without collisions when an AMS memory contains several paths, including those that have common areas; moving an AMS along a path when disturbances related to environmental observation limitations make it difficult to solve the localization task. These disturbances are overcome by generalizing the situation, which is performed by the inference mechanism of the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model.

In Chapter Three, a method of situational control of an autonomous mobile system with re-planning of the path, which ensures the performance of an AMS tasks in the event of unforeseen disturbances is developed. The proposed method uses the knowledge of an AMS about the known fragments of paths to synthesize new paths to ensure the achievement of the goal in a changing environment.

In Chapter Four, the development of information technology of navigation of an AMS based on the control model and re-planning method given in chapters 2 and 3 is proposed. The structure of an AMS on-board system software that supports the information technology of its navigation is proposed. The structure consists of five modules, three of which are based on the model developed in the thesis.

The information technology is used for field experiments. During the experiments, the completeness of an AMS path database was varied and obstacles in the environment were dynamically added, which made it impossible to move on known (or autonomously constructed when obtaining the movement goal) paths. The purpose of the experiments was to conduct a comprehensive test of the proposed information technology on the possibility of its use to solve the problem of monitoring spatially distributed objects. According to the results of the experiments, the suitability of the proposed system was established for conditions when the reach of the goal point of the movement is fundamentally possible, given the available knowledge, i.e., an AMS is able to choose or build a path in dynamic obstacles, combining the current location of an AMS with the goal point. If it is impossible to achieve the goal point in principle

due to insufficient current knowledge, an AMS is able to switch to a random motion mode, which allows replenishing the current knowledge base.

The results of dissertation research are presented in 17 scientific works of the author, namely: 4 scientific articles in periodicals, of which 3 articles in periodicals included in the list of scientific professional publications of Ukraine category "B", 1 article in a foreign periodical (Bulgaria); 1 chapter in a collective monograph published abroad (Switzerland); 12 publications in the proceedings of international and all-Ukrainian scientific conferences, among which 1 publication published in the proceedings of the international scientific conference, indexed by the Scopus database.

Keywords: autonomous mobile system, navigation, situational control, artificial intelligence technologies, cognitive robotics, rule-based systems, fuzzy information processing, integration of digital solutions, reinforced learning.

Список публікацій здобувача

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Каргін А. О., Іванюк О. І. Модель ситуаційного планування й керування переміщеннями автономного роботу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Вип. 4, № 3. С. 41–51. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.3.05.

2. Ivaniuk O. Navigation of Autonomous Systems based on Situation Control with Dynamic Replanning. *Information Processing Systems*. 2020. № 3 (162). P. 44–51. DOI: 10.30748/soi.2020.162.05.

3. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. DOI: 10.30837/itssi.2020.13.043.

4. Kargin A., Ivaniuk O., Cherneva G. Autonomous Robot Path Planning Methods Analysis. *Mechanics. Transport. Communications*. 2020. № 2020/2. P. 28–35.

5. Kargin A., Ivaniuk O., Panchenko A., Muhitovs R. Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. ICTE ToL 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure* / edited by Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M. Springer, Cham, 2019. P. 145-153. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6_20.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE, 2018. P. 464-468. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409178.

7. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування модифікованої моделі нечіткого виводу Такагі-Сугено-Канга в задачах когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 30 жовт. 2020 р. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 16–17.

8. Каргін А. О., Іванюк О. І. Багаторівнева модель навігації автономного робота, заснована на динамічному ситуаційному управлінні. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020»*, м. Одеса, 22-23 жовт. 2020 р. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 291–293.

9. Каргін А. О., Іванюк О. І. Представлення картографічних знань про оточення в моделях когнітивної робототехніки. *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*, м. Запоріжжя, 7-9 жовт. 2020 р. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 124–126.

10. Каргін А. О., Іванюк О. І. Полігон для натурних експериментів з моделями когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24-25 жовт. 2019 р. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 68–69.

11. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лучников Д. В. та ін. Система дистанційного управління мобільним роботом за допомогою голосових команд. *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод»*, м. Краматорськ, 18-20 квіт. 2019 р. Краматорськ: ДДМА, 2019. С. 19–21.

12. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування часової логіки в алгоритмах дослідження оточення мобільного робота. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24-26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 74–75.

13. Бриксін В. О., Іванюк О. І., Матюхова Н. О. та ін. Реалізація програмного та ситуаційного управління мобільним роботом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24-26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 72–73.

14. Іванюк О. І. Обробка первинних сенсорних даних для представлення у гранулярних обчисленнях. *Тези доповідей 80-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*, м. Харків, 24-26 квіт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 43–44.

15. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лахно О. Г. Організація взаємодії розумних машин та інтелектуальних сенсорів в інтернеті речей. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 30-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 26-27 жовт. 2017 р. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 80–81.

16. Каргин А. А., Иванюк А. И. Об одном подходе к построению систем мониторинга ситуаций на основе колесных роботов. *Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності»*, м. Львів, 16 листоп. 2017 р. Львів: НАСВ, 2017. С. 21.

17. Каргин А. А., Петренко Т. Г., Иванюк А. И. О научном полигоне для апробации решений индустриальной революции 4.0 в железнодорожной отрасли. *Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 80-річчю В. В. Свиридова «Інформаційні системи та технології»*, с. Коблево, 11-16 верес. 2017 р. Харків, 2017. С. 51–52.