

А. А. Проценко, В. Г. Іванов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКУ E-NETSIM ПРИ ВІЗУАЛЬНОМУ МОДЕЛЮВАННІ РУХУ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ

Анотація. Основне завдання методів пошуку шляху – генерувати можливий шлях через ділянку середовища при обході перешкод і мінімізації довжини шляху. Існуючі методи зосереджені на найкоротшому геометричному шляху до мети і не враховують різні параметри, такі як споживання енергії або складність ділянок шляху. У цій статті пропонується метод пошуку шляху та визначення його оптимальності за допомогою мереж Петрі. Окрім генерування рішень на основі кількох параметрів, цей метод дозволяє розширити візуальний зворотний зв'язок. При розрахунку оптимальності моделі використовують геометричну відстань від точки входу робота до мети по визначеному маршруту та витрати абстрактної величини енергії на пересування кожним маршрутом. **Об'єктом дослідження** є мережі Петрі та їх використання для моделювання процесу створення маршрутів та пошуку шляху для автономних роботів. **Предметом дослідження** є математичний апарат мереж Петрі та доцільність їх застосування при моделюванні процесу створення маршрутів та пошуку шляху для автономних роботів. **Метою наукової роботи** є демонстрація переваг мереж Петрі для візуального моделювання процесу пошуку шляху та руху автономних роботів. **Висновки.** Представлена методика доцільна до застосування при моделюванні процесу пошуку шляху та надає комплексну статистику для подальшої обробки та аналізу.

Ключові слова: автономний робот; пошук шляху; граф шляху; навігація; перешкоди; мережі Петрі; візуальне моделювання; E-NetSim.

Вступ

Дослідження у сфері пошуку шляху для автономних роботів (АР) є актуальними вже більше тридцяти років. Основною задачею цих методів є генерація можливого шляху через ділянку середовища з оминанням перешкод та мінімізацією довжини шляху. На даний момент існує велика кількість ефективних методів [1] пошуку шляху, однак більшість з них приймає до уваги найкоротший геометричний шлях до мети і не приймає до уваги такі параметри як енерговитрати або складність ділянок шляху. В залежності від середовища, конструкції роботу та конфігурації керування та методу руху, вибір оптимального для руху маршруту може змінюватись.

Додатковою проблемою є недостатній рівень візуальної інформації, що надається потенціальному оператору під час процесу планування шляху. При умовах, що навколишнє середовище перешкоджає зв'язку робота з оператором під час руху, можливість локалізувати місце знаходження робота та статус виконання ним поставленої задачі є необхідністю. Використання мереж Петрі надає можливість моделювання затримок на шляху, а також демонстрацію руху декількох АР на одному маршруті за рахунок моделювання черг та проходів.

Моделювання за допомогою мереж Петрі дозволяє отримати множину комплексних характеристик для оцінки оптимальності маршруту. Використання мереж Петрі при процесі пошуку шляху не нове. Клотцер та Махулея [2, 3] використовують спеціальний клас мереж Петрі, який називають кінцевим автоматом, для координації руху багатьох роботів. Моханта та Пархі розробили модель мереж Петрі, яка використовується щоб уникнути зіткнення між роботами та уникнення перешкод під час навігації [4]. У [5] запропоновано структуру математичної досяжності для мережі Петрі для навігації мобі-

льного робота. Таким чином, мережі Петрі звичайно використовуються для складання планів виконання задач одним або групою роботів, тимчасом як метою цієї роботи є розширення сфери застосування на алгоритми пошуку та оптимізації шляху. Мережі Петрі можливо комбінувати з великою кількістю методів пошуку шляху, при умовах що метод створює вузли для переміщення на карті.

Середовище візуального моделювання E-Net-Sim [6] дозволяє симулювати роботу алгоритмів пошуку шляху та оптимізації на основі мереж Петрі та дозволяє отримати візуальну інформацію під час моделювання.

Постановка проблеми

Припустимо, що існує деяка ділянка простору з точкою входу робота, перешкодами, та метою, яку треба досягти. Для отримання доцільного результату моделювання повинне задовільнити наступні умови:

- виконання розрахунку геометричної довжини існуючих шляхів від точки входу до мети.
- генерація та збереження статистики про пересування роботу та вторичних характеристик, таких як енерговитрати.
- розрахунок оптимального маршруту, використовуючи геометричну довжину та вторичні характеристики.

На рис. 1 зображено ділянку простору з перешкодами, перешкодами, на якій розмічено (одним з методів пошуку) граф з вузлів, відмічено початок та кінець та виділено 4 маршрути.

Першим кроком є перетворення графу $G = [V, E]$ на орієнтований граф $DG = [Vd, Ed, \varphi]$. Вважаючи, що кожне ребро що входить у кінцеву вершину, є частиною маршруту від старту до фінішу, процес починається з пошуку індексу кінцевої верхівки F_n у множині вузлів V . Ця верхівка позначається V_i та додається до множини вершин орієнтованого графу Vd (Лістинг 1).

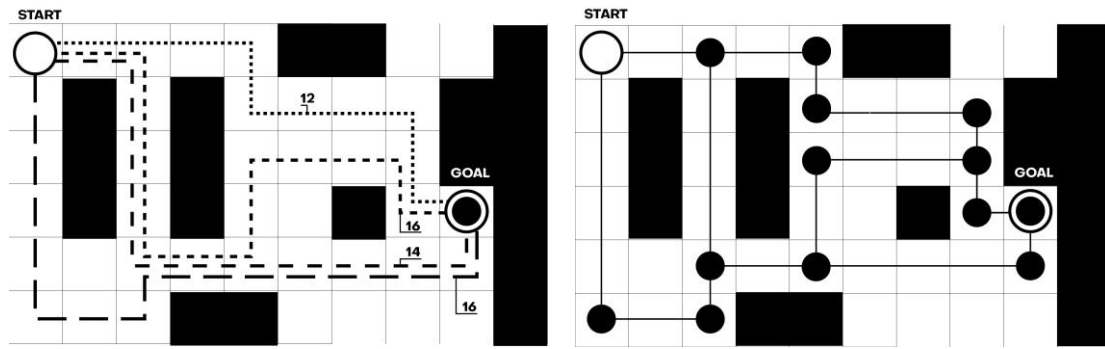


Рис. 1. Мапа ділянки з перешкодами та маршрути (Fig. 1. Area map with obstacles and routes)

```

Input: Fn, G = [V, E] *Finish, Undirected graph*
Output: DG = [Vd, Ed, φ] *Directed graph*
Locate Fn on a graph G;
Set Fn as Vi;
function add_node(Vi):
  Add Vi to Vd;
  For each Ej connected to Vi :
    if Ej ∈ Ed;
      pass;
    else:
      Add Ej to Ed;
      Set Vi as φi_head;
      Locate Vc connected by Ej
      Set Vc connected by Ej as φi_tail;
      For each Vcn:
        add_node(Vcn)
Return DG;
    
```

Лістинг 1

Після знаходження верхівки, алгоритм знаходить усі ребра E_j що входять у F_n та додає їх у до множини ребер орієнтованого графу Ed . До кожного ребра, що було додано до Ed , до множини напрямків φ додається напрямок $(\varphi_i_head, \varphi_i_tail)$ де φ_i_head це V_i а φ_i_tail є іншою вершиною з E_j . Алгоритм проходить усі вершини графу послідовно.

Наступним кроком є побудова структури Мережі Петрі $PN = [P, T, I, O]$ на основі орієнтованого графу $DG = [V, E, \varphi]$.

Мережа Петрі це графічний та математичний інструмент для моделювання систем. Формально [7], мережа Петрі описується як

$$PN = [P, T, I, O], \quad (1)$$

де P – множина місць, $P = [P_1, P_2, P_3 \dots P_n]$, де $n \in \mathbb{N}$, T – множина транзакцій, або переходів, $T = [T_1, T_2, \dots T_m]$, де $m \in \mathbb{N}$, I – множина вхідних функцій, тобто пар $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, що поєднує переходи та транзакції, O –

множина вихідних функцій, тобто пар $T \times P \rightarrow \{1, 0\}$, що поєднує транзакції та переходи.

Перетворення орієнтованого графу у мережу Петрі зображено наступному алгоритмі, що починається з пошуку індексу початкової верхівки St у множині вузлів V . Ця верхівка позначається V_i . Далі, алгоритм створює транзакцію T_i та додає V_i і T_i до множин P та T відповідно. Після цього, формується вхідна пара I_i що додається до множини I . Для кожної φ_i_tail що включає у себе V_i , формується вхідна пара O_i що додається до множини O . Алгоритм проходить усі вершини графу, що спрямовані від старту до фінішу, послідовно.

```

Input: St, DG = [V, E, φ] *Start, Directed graph*
Output: PN = [P, T, I, O] *Petri Net*
Locate St on a graph DG;
Set St as Vi;
function add_petri_pair(Vi, Ti):
  Create Ti;
  Add Vi to P;
  Add Ti to T;
  Add Ii(Pi x Ti → {0, 1}) to I;
  For each Vj ∈ φi_tail:
    Add Oj(Ti x Pi → {1, 0}) to O;
    add_petri_pair(Vj, Ti);
Return PN = [P, T, I, O];
    
```

Лістинг 2

Сформовану мережу Петрі зображено на рис. 2. Мережа під'єднана до генератора $G1$ що генерує новий маркер кожні 100 відносних одиниць часу. Маркери акумулюються у чергу $Q1$.

Кожна транзакція T має заданий змінною час транзакції та функцію транзакції (рис. 3) У даному випадку, функція переходу змінює загальний час очікування маркеру.

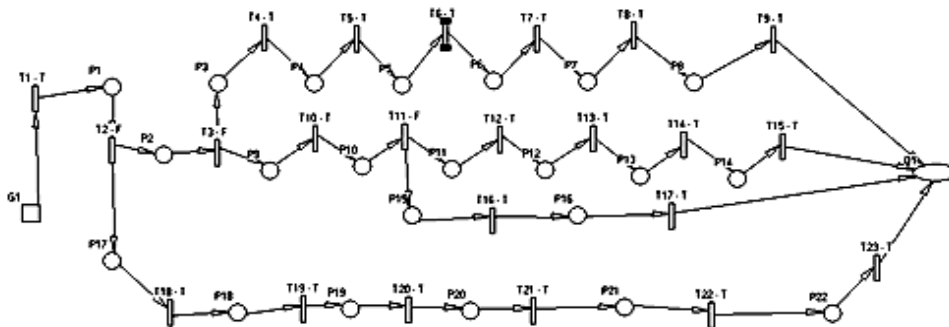


Рис. 2. Сформована мережа Петрі (Fig. 2. Constructed Petri Net)

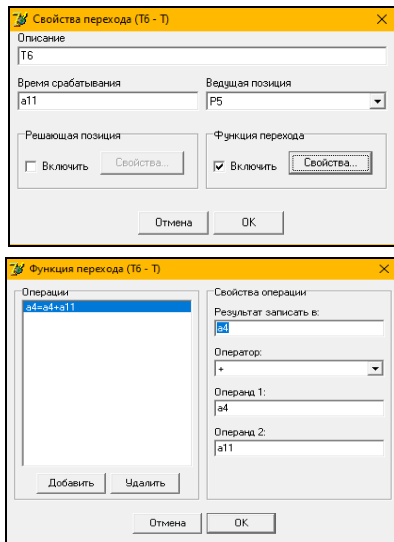


Рис. 3. Вікно властивостей транзакції та функція транзакції (Fig. 3. Transaction property window and transaction function)

Моделювання процесу пошуку шляху

Сформована абстрактна модель пошуку відображає хід роботи (маркеру) з затримками на кожній ділянці шляху. Якщо припустити, що маркер проходить одну відносну одиницю шляху за певний, заздалегідь визначений час, який еквівалентний часу затримки симуляції, то величина затримки на кожній ділянці буде дорівнювати довжині цієї ділянки у відносних одиницях. Результат моделювання з заданими відстанями зображено на рис. 4. Основною перевагою використання мереж Петрі є можливість моделювання процесу пошуку шляху з комплексними характеристиками.

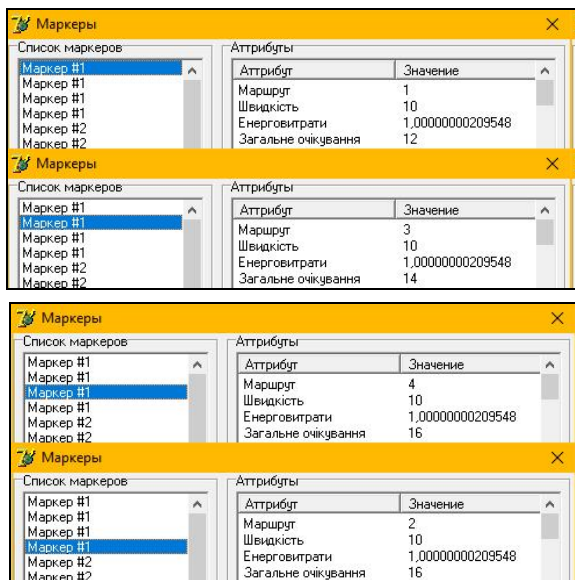


Рис. 4. Результат моделювання з фіксованою швидкістю (Fig. 4. The result of simulation with a fixed speed)

Додамо до попередньої моделі додатковий параметр — складність шляху α (рис. 5). Тепер кожен маркер буде мати дві унікальні характеристики: швидкість V і енерговитрати C . Таким чином час проходження кожного маркеру через різні маршрути буде залежати не тільки від довжини цього маршруту.

Завдяки цьому, ми можемо визначити оптимальний маршрут за двома критеріями.

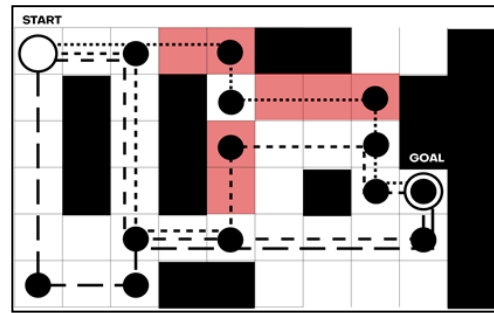


Рис. 5. Мапа ділянки з перешкодами, ускладненнями шляху та маршрутами (Fig. 5. Map of the area with obstacles, road complications and routes)

Під час процесу моделювання додаток E-Net-Sim показує параметри кожного маркера (рис. 6) на кожному маршруті у будь який момент часу. Це додатково надає оператору необхідну інформацію про процес пошуку шляху і надає можливості для коригування.

На ділянках, які представлені транзакціями T4, T6 та T12 складність маршруту збільшена у α разів $t_i = \alpha L_i/V_j$. Під час даного моделювання параметр α становив 10, параметр V — випадковою величиною $V = R(1,10)$, параметр C — випадковою величиною $V = R(1,20)$ для кожного маркеру.

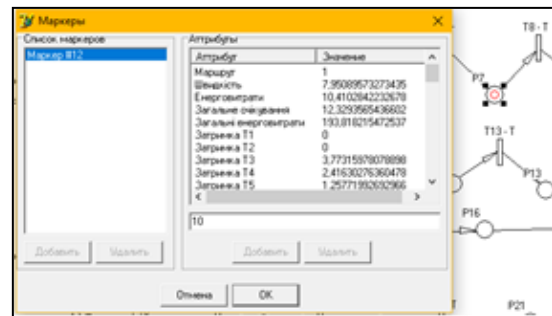


Рис. 6. Характеристики маркеру у даний момент (Fig. 6. Characteristics of the marker at the moment)

Графік результатів моделювання за часом (Σt) зображено на рис. 7, за енерговитратами (ΣC) — на рис. 8.

Обработка результатов моделирования

Використовуючи параметри Σt та ΣC , можливо визначити оптимальний маршрут для кожного AP, в залежності від ваги кожного параметру для процесу оптимізації. На рис. 9 зображено графік оптимальності кожного маршруту, де критерій затримки має вагу 0.7, а критерій енерговитрат — вагу 0.3. Результати оптимізації приведено в табл. 1 (M — місце у кожному експерименті). Керуючись даними результатами, можна встановити, що маршрут №1 є оптимальним у 54.45% випадків. На рис. 10 зображено графік оптимальності кожного маршруту, де критерій затримки має вагу 0.3, а критерій енерговитрат — вагу 0.7. Результати оптимізації приведено в табл. 2. За даними параметрами маршрут №3 є оптимальним у 85.14% випадків.

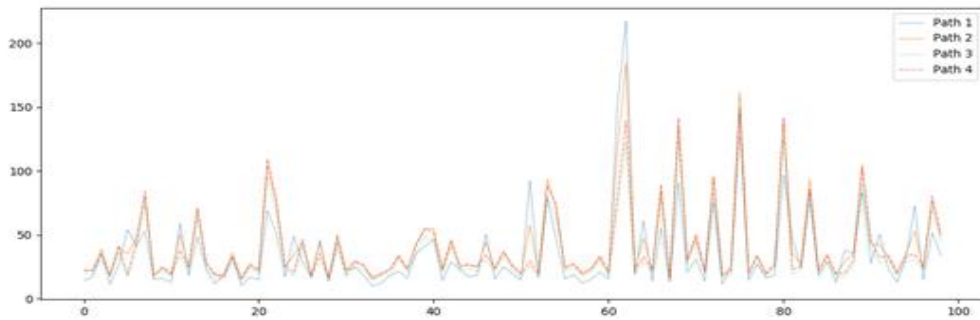


Рис. 7. Графік результатів моделювання за часом (Σt) (Fig. 7. Graph of simulation results by time (Σt))

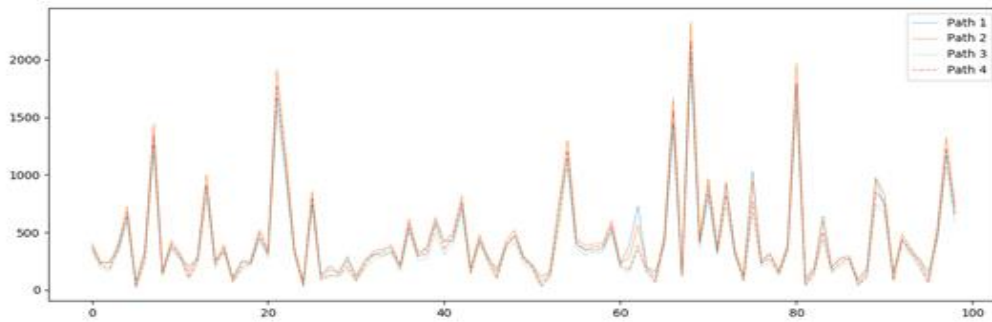


Рис. 8. Графік результатів моделювання за енерговитратами (ΣC) (Fig. 8. Graph of energy consumption simulation results (ΣC))

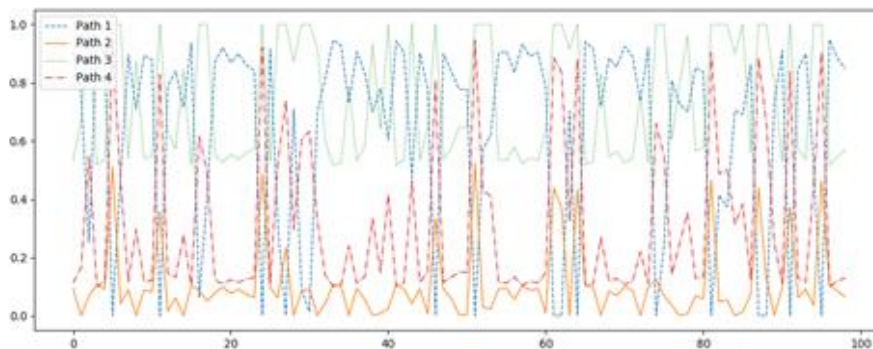


Рис. 9. Графік оптимальності кожного маршруту з параметрами (0.7, 0.3) (Fig. 9. Graph of optimality of each route with parameters (0.7, 0.3))

Таблиця 1 – Результати оптимізації з параметрами (0.7, 0.3)

| М | Шлях | | | |
|---|------|----|----|----|
| | №1 | №2 | №3 | №4 |
| 1 | 55 | 0 | 44 | 0 |
| 2 | 20 | 0 | 55 | 24 |
| 3 | 7 | 22 | 0 | 70 |
| 4 | 17 | 77 | 0 | 5 |

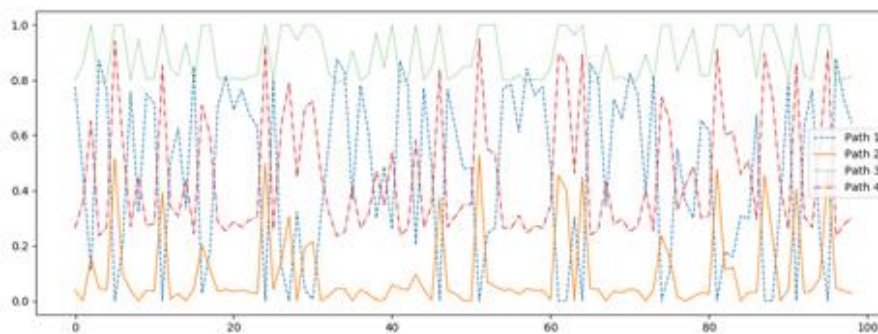


Рис. 10. Графік оптимальності кожного маршруту з параметрами (0.3, 0.7). (Fig. 10. Graph of optimality of each route with parameters (0.3, 0.7).)

Таблиця 2 – Результати оптимізації з параметрами (0.3, 0.7)

| М | Шлях | | | |
|---|------|----|----|----|
| | №1 | №2 | №3 | №4 |
| 1 | 13 | 0 | 86 | 0 |
| 2 | 42 | 0 | 13 | 44 |
| 3 | 23 | 21 | 0 | 55 |
| 4 | 21 | 78 | 0 | 0 |

Очікувано, результати у табл. 1 та 2 показують що, в залежності від вибору ваги різних критеріїв, вибір оптимального маршруту змінюється.

Висновки

Ця стаття описує використання моделі мережі Петрі для вирішення проблеми пошуку шляху для автономних роботів.

Як можна побачити з результатів експерименту, моделювання за допомогою мережі Петрі дозволяє знайти не тільки оптимальний результат використовуючи геометричну довжину маршруту, але й оптимальний результат з використанням додаткових характеристик, таких як енерговитрати.

Аналіз статистики, отриманої у результаті моделювання, допомагає спростити процес планування

навігації за умови використання роботів з різними технічними характеристиками.

Алгоритми описані у цій роботі можуть бути застосовані для реальних проблем планування шляху для роботів, особливо, коли умови навколишнього оточення не дозволяють відстежувати та керувати рухом робота на всій довжині маршруту.

Середовище моделювання E-NetSim показало себе успішним інструментом для моделювання різноманітних процесів за допомогою мереж Петрі. Набір інструментів представлений цим пакетом допомагає відстежувати рух маркерів у реальному часі та збирати цінну та різноманітну статистику про результати моделювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Проценко А., Иванов В. Класичні методи планування шляху для мобільних роботів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2019. Т. 3 (55). С. 143-151. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.143>.
2. Kloetzer, M., Mahulea, C. A Petri net based approach for multi-robot path planning. *Discrete Event Dyn. Syst.* 2014. Vol. 24. pp. 417–445. doi: <https://doi.org/10.1007/s10626-013-0162-6>.
3. C. Mahulea, Ed. Montijano, M. Kloetzer, Distributed Multirobot Path Planning in Unknown Maps Using Petri Net Models. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, Is. 2. Pp. 2063-2068. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2521>.
4. J.C. Mohanta, D.R. Parhi, S.K. Patel. Path planning strategy for autonomous mobile robot navigation using Petri-GA optimization, *Comp. & Electr. Eng.* 2011. Vol. 37, Is. 6. Pp. 1058-1070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2011.07.007>.
5. Gunardi, Yudhi, Dirman Hanafi, Fina Supegina, and Andi Adriansyah. Mathematics base for navigation mobile robot using reachability Petri net. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2018. 10, No. 1-9. Pp. 65-69.
6. Гавриленко С. Ю., Иванов В. Г. Разработка системы графического описания и моделирования распределенных программных объектов при проектировании информационных систем. *Системи обробки інформації*. 1 (2014): 10-13.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М. : Мир, 1984. 264 с.

Received (Надійшла) 15.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Проценко Андрій Андрійович – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; **Andrii Protsenko** – PhD student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: andrii.protsenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-7444> .

Іванов Валерій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; **Valeriy Ivanov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Systems Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: valeriy.ivanov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6419-3759> .

Using the E-Netsim application for visual simulation of the movement of the autonomous robots

Andrii Protsenko, Valeriy Ivanov

Abstract. The main task of path search methods is to generate a possible path through a section of the environment while bypassing obstacles and minimizing the path length. Existing methods focus on the shortest geometric path to the target and do not take into account various parameters, such as energy consumption or the complexity of sections of the path. This article proposes a method for finding a path and determining its optimality using Petri nets. In addition to generating solutions based on several parameters, this method allows you to expand the visual feedback. When calculating the optimality of the model using the geometric distance from the entry point of the robot to the goal along a certain route and the cost of the abstract amount of energy to move each route. **The object of research** is Petri nets and their use to model the process of creating routes and finding a way for autonomous robots. **The subject of research** is the mathematical apparatus of Petri nets and the feasibility of their use in modeling the process of creating routes and finding a way for autonomous robots. **The research aims** to demonstrate the benefits of Petri nets for visual modeling of the process of finding the path and motion of autonomous robots. **Conclusions.** The presented technique is suitable for use in modeling the process of finding a way and provides comprehensive statistics for further processing and analysis.

Keywords: autonomous robot; path search; path graph; navigation; obstacles; Petri nets; visual modeling; E-NetSim.

Использование приложения E-Netsim при визуальном моделировании движения автономных роботов

А. А. Проценко, В. Г. Иванов

Аннотация. Основная задача способов поиска пути – генерировать вероятный путь через участок среды при обходе препятствий и минимизации длины пути. Существующие методы сосредоточены на кратчайшем геометрическом пути к цели и не учитывают разные параметры, такие как потребление энергии или сложность участков пути. В данной статье предлагается способ поиска пути и определения его оптимальности с помощью сетей Петри. Помимо создания решений на основе нескольких параметров, этот метод позволяет расширить визуальную обратную связь. При расчете оптимальности модели используют геометрическое расстояние от точки входа робота до цели по определенному маршруту и затраты абстрактной величины энергии на передвижение по каждому маршруту. **Объектом исследования** являются сети Петри и их использование для моделирования процесса создания маршрутов и поиска для автономных роботов. **Предметом исследования** является математический аппарат сети Петри и целесообразность их применения при моделировании процесса создания маршрутов и поиска пути для автономных роботов. **Целью научной работы** является демонстрация преимуществ сети Петри для визуального моделирования процесса поиска пути и движения автономных роботов. **Выводы.** Представленная методика целесообразна для применения при моделировании процесса поиска пути и предоставляет комплексную статистику для дальнейшей обработки и анализа.

Ключевые слова: автономный робот; поиск пути; граф пути; навигация; препятствия; сети Петри; визуальное моделирование; E-NetSim.