

## ПРИМІТИВНА ПОВЕДІНКОВА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ОЧИЩЕННЯ ТЕРИТОРІЇ АВТОНОМНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

*Розглянуто структуру системи керування автономним мобільним роботом, що вирішує задачу очищення території. Досліджено особливості цієї задачі та запропоновано примітивну поведінкову модель і алгоритми поведінки мобільного робота для різних варіантів розміщення статичних об'єктів на території.*

**Ключові слова:** мобільний робот, поведінкова модель, очищення території.

### Вступ

Визначальною рисою сучасної промисловості є активне впровадження роботи технічних комплексів та систем. Відомі розробки використовуються також у побуті, військових цілях, медицині, в аграрній, аерокосмічній та інших галузях [1-4].

Поряд із успіхами у галузі робототехніки є ряд проблем, які потребують подальших досліджень і розвитку. Згідно статистики, наведеної у [5], на сьогодні використовується більше 10 мільйонів роботів, однак лише 5% оснащені хоча б одним сенсором. Інша частина таких систем є жорстко запрограмованими промисловими роботами, що виконують чітку послідовність кроків, не враховуючи можливі зміни зовнішнього середовища. Слід зазначити, що найбільш слабким місцем сучасних робототехнічних систем залишається їх автономність – властивість самостійно приймати рішення. Для успішної автономної діяльності робот повинен мати ефективні засоби для сприйняття, пізнавальної здатності та генерування дій [5]. Відомі автономні роботи мають ряд обмежень, таких як: низький рівень адаптивності, недостатній рівень реагування на зміни зовнішнього середовища та ін., що робить їх вузькоспеціалізованими. Тому актуальними є дослідження у напрямку розвитку моделей, методів та засобів, що забезпечать підвищення рівня автономності і універсальності роботів.

Для проведення досліджень та апробації отриманих рішень було обрано клас автономних мобільних роботів. Мобільний робот – це робот, що здатний пересуватись у робочому середовищі відповідно до керуючої програми [6]. Використання автономних мобільних роботів у різних галузях дозволяє уникнути спричинення шкоди людині або підвищити продуктивність праці. Прикладами діяльності

мобільних роботів є: контроль витоку шкідливих речовин або інших критичних ситуацій на промислових об'єктах; очищення від небезпечних речовин або проведення ремонтних робіт на територіях з високим рівнем радіоактивного випромінювання та інше.

Функціонуючи в умовах реального світу, автономний мобільний робот повинен динамічно взаємодіяти з ним. Сучасне покоління автономних роботів, таких як ASIMO від Honda або QRIO від Sony, мають високий рівень реалізації механічної складової і системи керування рухом. Вони планують майбутню активність та оцінюють поточний стан середовища для майбутнього планування [7, 8]. Однак алгоритми їх систем керування мають високу складність та вимагають значних обчислювальних ресурсів. Натомість, з точки зору ефективності, складність задачі та засобів для її вирішення повинні бути відповідними. Для виявлення зв'язку між складністю задачі та підходами до її вирішення розглядається одна із задач робототехніки – задача очищення території. Основна підзадача очищення території – переміщення об'єктів за межі території. Вона включає розроблення: методу вибору об'єкта для переміщення, методу побудови траєкторії переміщення та засобів отримання роботом інформації про стан зовнішнього середовища. Методи побудови траєкторії руху мобільного робота та засоби отримання роботом інформації про стан зовнішнього середовища є достатньо дослідженими. Запропоновані у [9-11] рішення ефективно вирішують відповідні задачі. Також відомі алгоритми вирішення задач маніпулювання об'єктами [12, 13]. Але задача розроблення поведінкової моделі автономного мобільного робота для задачі очищення території залишається актуальною.

На сьогодні не існує ефективного алгоритму,

який гарантував би вирішення задачі очищення території за скінченну кількість переміщень при функціонуванні в умовах реального світу. Тому була поставлена задача розроблення такого алгоритму очищення території, який мінімізує необхідні обчислювальні ресурси. Назвемо такий алгоритм – «примітивним».

## 1. Опис робототехнічної системи

В якості прототипу використано робототехнічну систему, до складу якої входить мобільний робот на базі мікроконтролера, жорстко закріплена над робочою поверхнею відеокамера та керуючий персональний комп'ютер (рисунок 1). Керуючий персональний комп'ютер (ПК) використовує відеокамеру для визначення позиції мобільного робота та об'єктів. Для спрощення мобільної платформи та зняття обмежень щодо доступної продуктивності обчислювальної системи, всі обчислення перенесені на керуючий ПК. Мобільний робот отримує від керуючого ПК команди щодо руху та виконує їх.

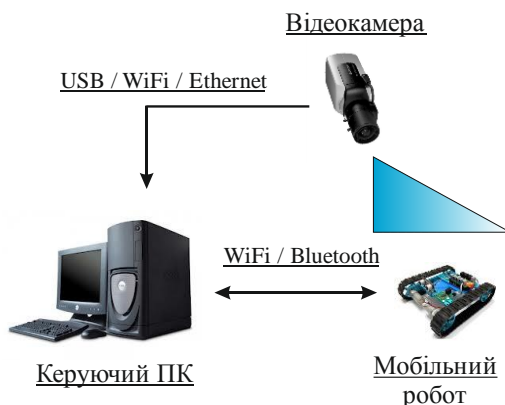


Рис.1. Структура робототехнічної системи

Програмна складова системи керування містить два компоненти. Перший – система комп'ютерного зору, яка надає інформацію про місце розташування мобільного робота та об'єктів. Програмне забезпечення системи комп'ютерного зору написано на мові C++ з використанням відкритих бібліотек OpenCV [14]. Другий компонент – система керування, котра аналізує поточний стан, приймає рішення щодо переміщення мобільного робота та генерує потік команд керування його рухом.

## 2. Загальні вимоги

Сформулюємо загальні вимоги для задачі очищення території:

- територія для очищення мобільним роботом  $MR$  – випукла область на площині, котра визначається деяким обмежувачем, напри-

клад, чорна суцільна замкнута лінія. Позначимо цю територію як  $A$ ;

- мобільний робот  $MR$  розташовується в довільній точці на території  $A$ ;
- на території  $A$  знаходиться скінченна множина статичних об'єктів  $O = \{O_1, O_2, O_3, \dots, O_n\}$ . Центром ваги статичного об'єкта будемо вважати центр описаного кола. Кожен статичний об'єкт  $O_i, 1 \leq i \leq n$  характеризується трійкою елементів  $(x_i, y_i, r_i)$ , де  $x_i, y_i$  - координати центру ваги об'єкта  $O_i$  відносно глобальної системи координат,  $r_i$  - радіус описаного кола (рисунок 2);
- фізичні параметри кожного статичного об'єкта (вага, розмір) дозволяють мобільному роботу «виштовхати» об'єкт за межі визначеної території;
- мобільний робот одночасно може взаємодіяти тільки з одним об'єктом.

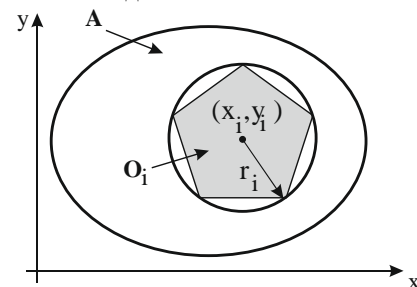


Рис.2. Статичний об'єкт  $O_i$  на території  $A$

Задача мобільного робота – провести очищення території від статичних об'єктів. Для опису алгоритму очищення території визначимо наступні поняття.

**Поняття 1.** Радіус маневру мобільного робота  $R_{MR}$  – мінімально необхідний радіус описаного навколо  $MR$  кола, що дозволяє йому позиціонуватися у довільному напрямі, з врахуванням фізичних властивостей платформи (рисунок 3).

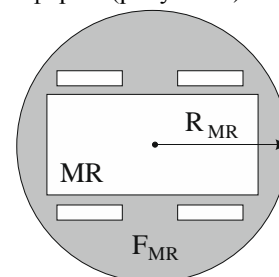


Рис. 3. Область маневру мобільного робота

**Поняття 2.** Область маневру робота  $F_{MR}$  - це круг, з радіусом  $R_{MR}$  та центром в точці з координ-

татами  $(x_{MR}, y_{MR})$ , які визначають поточне місце розташування мобільного робота (рисунок 3).

**Поняття 3.** Коридор  $T$  об'єкта  $O_i$  - це чотирикутник розміром  $l$  на  $w$  (рисунок 4). Значення  $l$  - це відстань від центру ваги об'єкта  $O_i$  до певної точки лінії, що обмежує територію  $A$ . Значення  $w$  - визначається як максимальне серед двох значень  $w = \max(w_{O_i}, w_{MR})$ , де  $w_{O_i} = 2 \cdot r_i$  - діаметр описаного кола об'єкта  $O_i$ ,  $w_{MR} = 2 \cdot R_{MR}$  - діаметр області маневру  $F_{MR}$ .

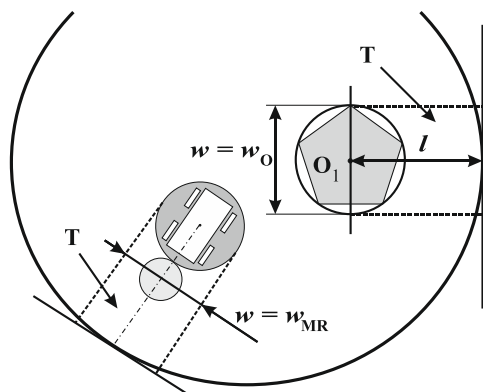


Рис. 4. Приклад визначення коридору для статичних об'єктів

**Поняття 4.** Мінімальний коридор  $T_{\min}$  для об'єкта  $O_i$  - це коридор, значення  $l$  якого є найменшим, серед можливих (рисунок 5).

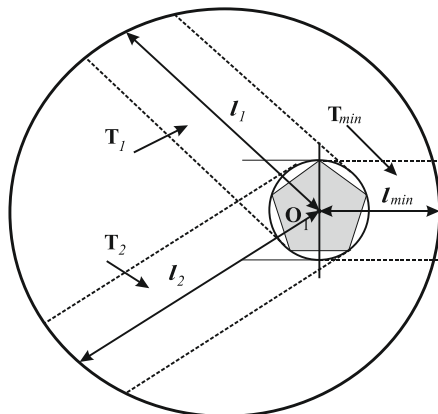


Рис. 5. Визначення мінімального коридору

**Поняття 5.** «Чистий» коридор  $T^c$  - коридор, всередині якого відсутні будь-які об'єкти.

Наявність чистого коридору для  $i$ -го об'єкта є однією з обов'язкових ознак можливості виштовхати заданий об'єкт за межі території  $A$ .

**Поняття 6.** Місце «старту»  $S_{O_i}$  - позиція, в якій повинен знаходитись мобільний робот  $MR$ ,

перед початком виштовхування об'єкта  $O_i$  за межі території  $A$  по коридору  $T^c$ .

Місце старту  $S_{O_i}$  характеризується координатами  $(x_S, y_S)$ . Мобільний робот  $MR$  знаходиться в місці старту, якщо  $x_{MR} = x_S$  та  $y_{MR} = y_S$  (рисунок 6).

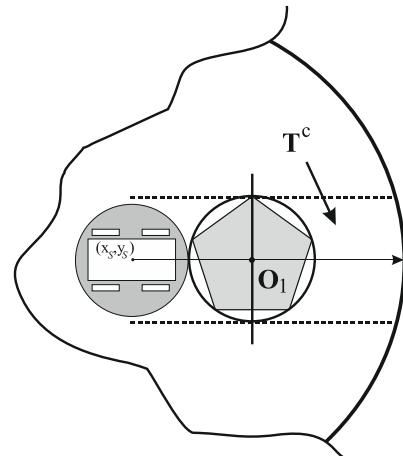


Рис. 6. Визначення місця старту

З врахуванням введених понять визначимо обов'язкові умови для виштовхування мобільним роботом статичного об'єкта  $O_i$  за межі заданої території.

*Умова 1.* Для  $O_i$  існує чистий коридор  $T^c$ .

*Умова 2.* Область маневру  $F_{MR}$  в точці старту є вільною від інших об'єктів.

*Умова 3.* Існує можливість побудувати траєкторію і перемістити мобільного робота до місця старту.

Виконання усіх трьох умов для об'єкта гарантує можливість його виштовхування мобільним роботом за межі території.

### 3. Алгоритм очищення території

Розглянемо випадок, коли на території знаходиться лише один статичний об'єкт  $O_1$ , який слід виштовхати, а область дії значно більша ніж розміри мобільного робота та об'єкта. Тоді алгоритм вирішення цієї задачі буде наступним:

#### Алгоритм 1.

- 1) визначити  $T_{\min}$  для об'єкта  $O_1$ ;
- 2) для  $T_{\min}$  визначити  $S$ ;
- 3) перемістити  $MR$  у точку  $(x_S, y_S)$ ;
- 4) виконати позиціонування  $MR$ ;
- 5) виштовхати об'єкт по коридору  $T_{\min}$ .

Якщо на території знаходиться більше одного об'єкта, для кожного з них мінімальний коридор є чистим, та відстань між об'єктами не менша ніж  $2 \cdot R_{MR}$ , то алгоритм очищення території наступний:

**Алгоритм 2.**

- 1) для всіх  $O_i \in O$  визначити  $d_i$ - відстань до  $MR$ ;
- 2) визначити об'єкт  $O_m$  для якого  $d_m = \min(d_1, d_2, \dots, d_n)$ ;
- 3) для об'єкта  $O_m$  визначити  $T_{\min}$ ;
- 4) для  $T_{\min}$  визначити  $S$ ;
- 5) перемістити  $MR$  у точку  $(x_S, y_S)$ ;
- 6) виконати позиціонування  $MR$ ;
- 7) виштовхати об'єкт  $O_m$  по коридору  $T_{\min}$ ;
- 8) якщо  $O = \emptyset$  кінець, інакше перейти до п.1.

Відзначимо, що для обох розглянутих алгоритмів визначення траєкторії руху мобільного робота від поточної позиції до точки старту здійснюється за допомогою алгоритму  $A^*$  [9].

Алгоритми 1 та 2 застосовуються лише у ситуаціях, коли для кожного об'єкта існує мінімальний коридор і він є чистим. Також, як було зазначено раніше, мінімальна відстань між об'єктами повинна бути  $2 \cdot R_{MR}$ . Це забезпечує можливість позиціонування  $MR$  відповідно до визначеного коридору для кожного об'єкта та є умовою існування шляху від поточної позиції  $MR$  до точки старту довільного об'єкта.

Розглянемо більш складні варіанти розташування об'єктів на території. Наприклад, мінімальний коридор поточного об'єкта не є чистим, або область маневру  $MR$  в позиції старту для об'єкта  $O_i$  не є вільною (рисунок 7).

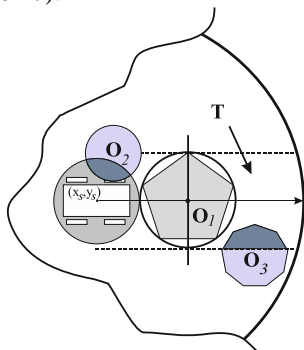


Рис. 7.  $F_{MR}$  та  $T$  зайняті сторонніми об'єктами

В такій ситуації, запропонований раніше Алгоритм 2 слід модифікувати. Результат модифікації представлено Алгоритмом 3.

**Алгоритм 3.**

- 1) Для всіх  $O_i \in O$  визначити  $d_i$ - відстань до  $MR$ ;
- 2) визначити поточний об'єкт  $O_c$  для якого  $d_c = \min(d_1, d_2, \dots, d_n)$ ;
- 3) для  $O_c$  визначити  $T_{\min}$ ;
- 4) для  $T_{\min}$  визначити  $S$ ;
- 5) якщо  $T_{\min}$  є чистим та  $F_{MR}$  при  $(x_{MR} = x_S, y_{MR} = y_S)$  є вільною перейти до п.10;
- 6) побудувати новий коридор  $T_j$  зміщуючись по колу відносно центру ваги об'єкта  $O_c$  (рисунок 8), доки не отримаємо чистий коридор або не повернемося до вихідної позиції  $T_j = T_{\min}$ ;
- 7) якщо  $T_j = T_{\min}$  та є неопрацьовані об'єкти, вибрати наступний  $O_c = O_{c+1}$  відстань  $d_{c+1}$  якого найменша серед решти та перейти до п.3, інакше, якщо опрацьовані всі  $O_i \in O$  та для жодного з об'єктів не виконуються умови виштовхування, то перейти до п.14;
- 8) для  $T_j$  визначити  $S$ ;
- 9) якщо  $F_{MR}$  при  $(x_{MR} = x_S, y_{MR} = y_S)$  є вільною перейти до п.10, інакше перейти до п.6;
- 10) перемістити  $MR$  у точку  $(x_S, y_S)$ ;
- 11) виконати позиціонування  $MR$ ;
- 12) виштовхати поточний об'єкт по коридору  $T_j$ ;
- 13) якщо  $O = \emptyset$ , то завершення з повідомленням про успішне виконання задачі очищення, інакше перейти до п.1;
- 14) завершення з повідомленням про неможливість виконати очищення території.

Якщо  $\forall O_i \in O$  виконуються **Умови 1-3**, то

**Алгоритм 3** забезпечує очищення території за скінченний проміжок часу. В іншому випадку, Алгоритм 3 не гарантує виконання задачі очищення заданої території.

**Приклад 1.** Якщо відстань між об'єктами буде меншою за  $2 \cdot R_{MR}$ , це може призводити до неможливості встановлення  $MR$  у позицію старту для об'єкта з існуючим чистим коридором (рисунок 9).

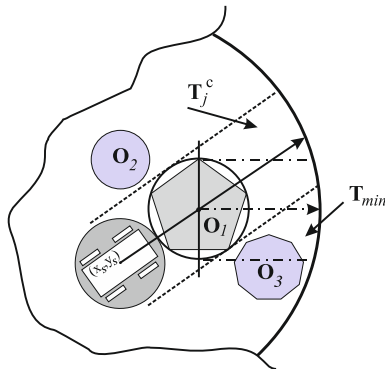


Рис.8. Пошук чистого коридору  $T_j^C$

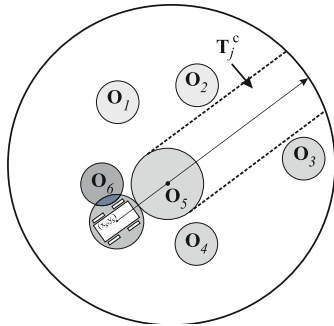


Рис.9. Відсутність місця старту для визначеного чистого коридору

**Приклад 2.** Для  $\forall O_i \in O$  існує множина чистих коридорів, для яких існує точка старту, в якій  $F_{MR}$  при  $(x_{MR} = x_S, y_{MR} = y_S) \in$  вільною. Але не існує шляху від поточного місця розташування  $MR$  до точки старту (рисунок 10).

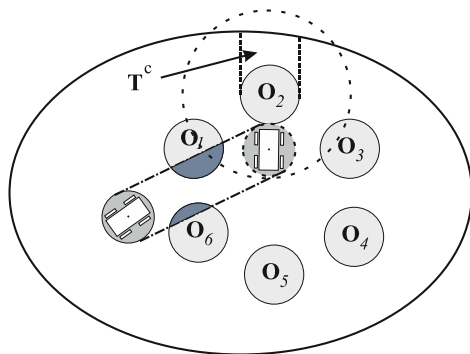


Рис.10. Відсутність шляху до місця старту

Обидва приклади вказують на те, що достатньою умовою, яка гарантує очищення території є наявність відстані між двома сусідніми об'єктами  $(O_i, O_{i+1})$  не меншої ніж  $2 \cdot R_{MR}$ . З іншого боку, для успішного застосування алгоритму 3 у прикладі 2, необхідною умовою є наявність відстані не менше ніж  $2 \cdot R_{MR}$  хоча б між однією парою сусідніх об'єктів (рисунок 11).

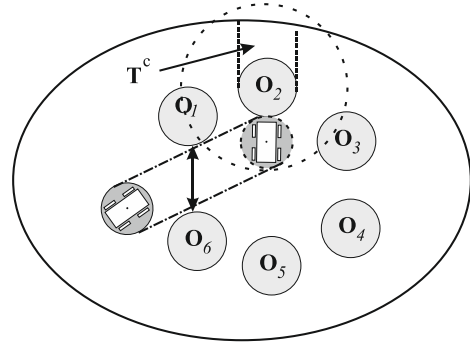


Рис. 11. Умова застосовності Алгоритму 3 для Прикладу 2

Вказані вимоги є обов'язковими у випадку, коли множина об'єктів  $O$  формує замкнуту область, в середину якої не може переміститися  $MR$ . В інших випадках ці умови не є обов'язковими, наприклад, рисунок 12.

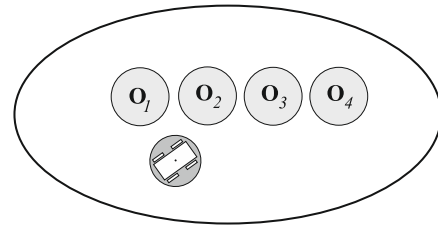


Рис. 12. Ситуація, коли відстань між сусідніми об'єктами не є принциповою для очищення території

Отже, вирішення ситуацій описаних в прикладах 1 та 2 вимагає додаткового, більш трудомісткого аналізу розташування об'єктів на території. А також вимагає виконання мобільним роботом операцій, які відрізняються від операції виштовхування об'єкта за межі території, наприклад, переміщення об'єктів у заданому напрямі на задану відстань. Виконання цієї операції дозволить змінювати початкове розташування об'єктів, а відповідно, забезпечить очищення території з використанням Алгоритмів 1-3.

## Висновки

В роботі розроблено поведінкову модель та алгоритми вирішення задачі очищення території автономним мобільним роботом. Представлені алгоритми мінімізують вимоги до обчислювальних ресурсів. Разом з тим, існує ряд ситуацій, коли використання запропонованого підходу не гарантує вирішення задачі очищення території. Подальшим напрямком досліджень авторів є розроблення моделей, методів та алгоритмів очищення території автономним мобільним роботом для складних варіантів розміщення статичних об'єктів.

## Література

1. *iRobot Create Open Interface Specification*. iRobot Corporation. – 2006. – 25 p.
2. *Patrick Lin Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics, and Design* / Patrick Lin, George Bekey, Keith Abney. - US Department of Navy. – 2008. – 108 p.
3. *Ryan A. Beasley Medical Robots: Current Systems and Research Directions* / Ryan A. Beasley // *Journal of Robotics*. Hindawi Publishing Corporation – 2012. - 14 p.
4. *George Bekey International Assessment of Research and Development in Robotics* / George Bekey, Robert Ambrose, Vijay Kumar, Art Sanderson, Brian Wilcox, Yuan Zheng. - World Technology Evaluation Center, Inc. – 2006. – 273 p.
5. *Henric Christensen Cognitive Systems – From Internet to Robotics* / Henric Christensen. - European Research Consortium for Informatics and Mathematics, №84. – 2011. pp. 14-15.
6. *Робототехника. Терминология* / под редакцией Е.П. Попова: Российская академия наук. Комитет научной терминологии в области фундаментальных наук. – М., 2000. – 47 с.
7. <http://asimo.honda.com/>
8. <http://www.sonyaibo.net/aboutqrio.htm>
9. *S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Personal Education, 2003
10. *Damion D. Dunlap, Charmane V. Caldwell, Emmanuel G. Collins, Jr. and Oscar Chuy, "Motion Planning for Mobile Robots Via Sampling-Based Model Predictive Optimization"*, *Recent Advances in Mobile Robotics*, Dr. Andon Topalov (Ed.), 2011
11. *Pascal Morin and Claude Samson, "Motion control of wheeled mobile robots"*, INRIA, 2004
12. *Emery, R. and Balch, T., "Behavior-Based Control of a Non-Holonomic Robot in Pushing Tasks"*, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-2001)*, Seoul, 2001.
13. *B. P. Gerkey and M. J. Mataric', "Pusher-watcher: An approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination,"* in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, Washington, DC, May 2002, pp. 464–469.
14. *Д. Медзатий, Б. Гребенюк, А. Жумела Аналіз зображень та розпізнавання образів для систем керування мобільними платформами // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції ACSN'11. - Львів: НВФ "Українські технології".-2011. - С.263-264.*

### ПРИМИТИВНАЯ ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОЧИСТКИ ТЕРРИТОРИИ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

*О.В. Поморова, Д.Н. Медзатий*

Рассмотрено структуру системы управления автономным мобильным роботом, который решает задачу очистки территории. Исследованы особенности этой задачи и предложено примитивную поведенческую модель и алгоритмы поведения мобильного робота для разных вариантов размещения статических объектов на территории.

**Ключевые слова:** мобильный робот, поведенческая модель, очистка территории.

### THE SIMPLE BEHAVIORAL MODEL AND ALGORITHMS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT FOR TERRITORY CLEANING

*O.V. Pomorova, D.M. Medzaty*

The control system of autonomous mobile robot for territory cleaning was considered. The specific of territory cleaning task has been carried out. The simple behavioural model and algorithms for territory cleaning mobile robot was worked out. The different combination of object placement has been considered.

**Key words:** mobile robot; behavioral model; territory cleaning.

**Поморова Оксана Вікторівна** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, e-mail: o.pomorova@gmail.com.

**Медзатий Дмитро Миколайович** – к-т техн. наук, доцент кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, e-mail: d.medzaty@gmail.com.