

# РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМ ТРАНСПОРТУВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМ НА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Д.т.н. О.І. Филипенко, О.В. Сичова, Є.І. Водолазкий, Харківський національний університет радіоелектроніки

*В роботі описані методи визначення траєкторії переміщення мобільного робота площиною з перешкодами. Для вирішення задачі оптимізації траєкторії руху транспортного робота у виробничому цеху серед неоднорідних перешкод пропонується використовувати навігаційну систему, яка визначає власні координати робота, планує траєкторію в поточний момент часу і управляє його рухом.*

*В работе описаны методы определения траектории перемещения мобильного робота по плоскости с препятствиями. Для решения задачи оптимизации траектории движения транспортного робота в производственном цехе среди неоднородных помех предлагается использовать навигационную систему, которая определяет собственные координаты робота, планирует траекторию в текущий момент времени и управляет его движением.*

*The paper describes methods for determining the trajectory of movement of a mobile robot with an obstacle plane. To solve the problem of optimizing a transport robot movement trajectory in a production manufactory among mixed obstacles, it is proposed to use a navigation system that defines its own coordinates of the robot, plans the trajectory at the current time and controls its movement.*

**Ключові слова:** адаптивна система, алгоритм навігації, інтелектуальне виробництво, транспортувальна платформа

## Вступ

В даний час все більш популярними стають сервісні мобільні роботи. Актуальність теми досліджень обумовлена необхідністю оптимізації траєкторії переміщення таких транспортних роботів при перевезенні заготовок, деталей і складальних одиниць у виробничих цехах серед неоднорідних перешкод між коморами і ділянками, з однієї ділянки на іншу, та між робочими місцями.

Для цього необхідно оптимізувати траєкторію руху транспортного робота у виробничому цеху серед неоднорідних перешкод для значного зменшення тривалості транспортних операцій, тобто забезпечення найкоротшого шляху проходження всіх стадій і операцій виробничого процесу, від запуску у виробництво вихідних матеріалів, до виходу готової продукції.

У вирішенні задачі використовується навігаційна система, яка визначає власні координати робота, планує траєкторію в поточний момент часу і управляє його рухом. Оскільки реальна середа, в якій знаходиться робот, зазвичай містить рухливі перешкоди (люди, інші мобільні роботи тощо), то рух по попередньо заданій траєкторії є практично неможливим.

## Методи визначення траєкторії переміщення транспортного робота по площині з перешкодами

Для транспортно-завантажувальних робіт в автоматизованому виробництві поширення набули промислові роботи та маніпулятори.

На виробництві такі транспортувальні роботи повинні мати наступні ознаки:

- автоматичне керування;
- здатність до швидкого і відносно легкого перепрограмування (зміни послідовності, системи і змісту команд).

Існує низка методів трасування шляху робота на площині з перешкодами. Найпоширеніші – це хвильовий алгоритм, алгоритми з елементами евристики, а також алгоритм пошуку шляхів з умовною назвою Алгоритм А\*. Крайній алгоритм трасування мобільних роботів базується на методі віртуальних потенціалів, запропонований А.К. Платоновим [1].

Для навігації в даному випадку використовується мнемонічна модель, згідно з якою навколишні об'єкти ніби притягують або відштовхують мобільного робота в процесі його руху. При цьому вважається, що точка цілі має деякий «позитивний» заряд, фігури – перешкоди заряджені «негативно», рухлива точка – робот заряджена також «негативно». Розташування точок цілі і перешкод фіксовані.

Припустимо, що заздалегідь побудовано цифрову модель положень контейнерів на площині складу, наприклад, з використанням технологій радіочастотної ідентифікації. Тоді множина прямокутників (проекцій контейнерів на площину) можна зобразити на екрані комп'ютера оператора складу, в результаті чого вершини кожного з прямокутників можна пов'язати з певними числами – тобто обчислити їх координати.

Геометричне пояснення методу віртуальних потенціалів при визначенні шляху робота полягає в описі і побудові графіка віртуальної потенційної функції [2]. Цей графік має вигляд нахиленої поверхні з глобальним мінімумом в кінцевій точці траєкторії руху робота. На графіку перешкоди (з високим потенціалом) для робота виглядають як «пагорби» (рис. 1, а).

Так ілюструється властивість кінцевої точки «притягувати» і властивість перешкод «відштовхувати». Тоді роботом будемо вважати кібернетичний об'єкт, здатний відстежувати негативний градієнт повного потенціалу поля, що забезпечить досягнення кінцевої точки. На рис. 1, б наведена структура графіка віртуальної потенційної функції і його властивість завжди дорівнювати сумі двох графіків – графіка функції тяжіння і графіка функції відштовхування.

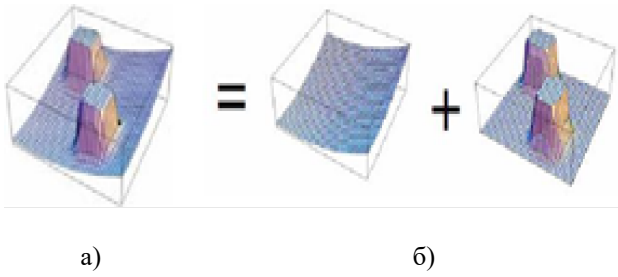


Рис. 1. Графік віртуальної потенційної функції (а); структура графіка потенційної функції (б)

Дана графічна ілюстрація допомагає уявити мнемонічний прийом визначення траси робота. А саме, траса робота буде ортогональною проекцією на координатну площину траєкторії переміщення за графіком віртуальної потенційної функції важкої кулі в полі «вертикального» тяжіння.

Опис віртуальної потенційної функції для прямокутної перешкоди запишемо у вигляді [3]:

$$w(x, y) = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} + \frac{1}{(f(x, y))^2}$$

де  $x_c, y_c$  – координати точки цілі;  $f(x, y)$  – функція, яка входить до рівняння контуру фігури перешкоди і лініями рівня якої повинна бути сім'я еквідистанта щодо цього контуру.

Як приклад розглянемо найпоширенішу фігуру перешкод – прямокутник, який є проекцією на площину типового контейнера – паралелепіпеда.

Виберемо на площині декартову систему координат  $Oxy$ , в якій заздалегідь побудована цифрова модель положень контейнера, тобто відомі координати кутів прямокутника розміром  $\{[a; b] \times [c; d]\}$ . Набір зовнішніх еквідистант прямокутника за допомогою  $R$ -функції опишемо рівнянням у вигляді:

$$f(x, y) = \sqrt{((a \vee_1 x) - (b \wedge_1 x))^2 + ((c \vee_1 y) + (d \wedge_1 y))^2} = 0$$

Представимо геометричне тлумачення  $R$ -кон'юнкції і  $R$ -диз'юнкції. Розглянемо дві множини точок, які є опорними областями функцій  $f_1$  і  $f_2$ . Опорною областю функції  $f(x, y)$  назвемо множину точок площини  $Oxy$ , де функція  $f(x, y)$  приймає невід'ємне значення. Тоді  $R$ -кон'юнкція  $f_1 \wedge_1 f_2$  називається функція, опорна область якої буде перетином початкових опорних областей. А  $R$ -диз'юнкція  $f_1 \vee_1 f_2$  називається функція, опорна область якої буде об'єднанням початкових опорних областей. Серед аналітичних описів  $R$ -кон'юнкції і  $R$ -диз'юнкції виберемо наступні:

$$f_1(x, y) \wedge_1 f_2(x, y) = \frac{1}{2}(f_1(x, y) + f_2(x, y) - |f_1(x, y) - f_2(x, y)|);$$

$$f_1(x, y) \vee_1 f_2(x, y) = \frac{1}{2}(f_1(x, y) + f_2(x, y) + |f_1(x, y) - f_2(x, y)|);$$

Графічне трактування  $R$ -диз'юнкції полягає в мнемонічному прийомі «освітлення» в просторі системи координат  $Oxyz$  непрозорих графіків функцій  $z = f_1(X, y)$  і  $z = f_2(X, y)$  джерелом світла, спрямованим вздовж напрямку осі  $Oz$ . Множина точок на «освітлених» частинах графіків дає уявлення про графік  $R$ -диз'юнкції (рис. 2).

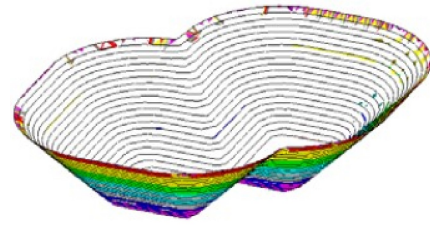


Рис. 2. Графік функції  $z = f_1 \vee_1 f_2$

Графічне трактування  $R$ -кон'юнкції полягає у виявленні «освітлених» частин непрозорих графіків функцій  $z = f_1(X, y)$  і  $z = f_2(X, y)$ , коли промені джерела світла спрямовані назустріч напрямку осі  $Oz$ . Множина точок на «освітлених» частинах непрозорих графіків дає уявлення про графік  $R$ -кон'юнкції.

**Розрахунок шляху переміщення точки між перешкодами**

Множина  $N$  прямокутників розміром  $\{[a_k; b_k] \times [c_k; d_k]\}$  ( $k = 1 \dots N$ ) опишемо рівнянням:

$$f(x, y) = \bigvee_{k=0}^N \sqrt{((a_k \vee_1 x) - (b_k \wedge_1 x))^2 + ((c_k \vee_1 y) + (d_k \wedge_1 y))^2} = 0$$

Тоді  $f(x, y) = const$  буде рівнянням набору еквідистант об'єднання прямокутників.

На рис. 3 подано приклад еквідистант множини прямокутників, побудованих за координатами їх вершин, які, повертаючись до методу віртуальних потенційних функцій, умовно можна вважати лініями рівних віртуальних потенціалів [4].

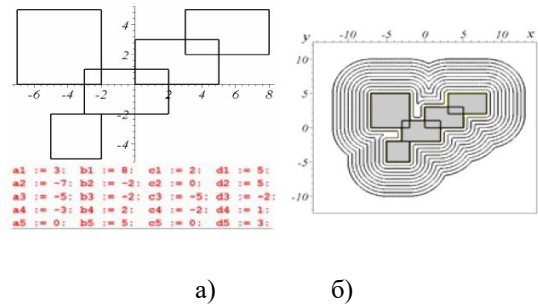


Рис. 3. Прямокутники, побудовані за координатами вершин (а); еквідистанта множини прямокутників (б)

Нехай  $N$  прямокутників описано рівняннями  $f_i(x, y) = 0$ . Віртуальну потенційну функцію, яка досягає глобального мінімуму в точці з координатами  $C(x_c, y_c)$  і має «пагорби» над відповідними  $N$  прямокутниками, слід описувати так:

$$W(x, y) = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} + \frac{1}{(\bigvee_{i=0}^N f_i(x, y))^2}$$

У випадку, якщо буде задано п'ять прямокутників (рис. 4, а) і точка цілі  $(-10, -10)$ , то лінії рівня будуть побудовані за допомогою попередньої формули, яка є описом віртуальної потенційної функції за графіком, зображеним на рис. 4, б.

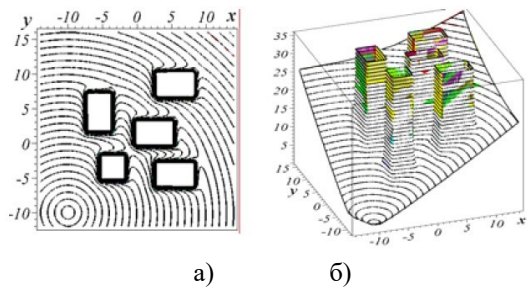


Рис. 4. П'ять прямокутників (а) та графік віртуальної потенційної функції (б)

На прикладі методу мінімізації функцій градієнтним спуском з постійним кроком була складена програма побудови траєкторії руху важкої кульки в поле «вертикального» тяжіння за поверхнею графіка віртуальної потенційної функції в залежності від положення обраної стартової точки. Особливістю алгоритму є те, що під час старту заздалегідь відома кінцева точка екстремуму – точка цілі  $C(x_c, y_c)$ , і на етапах кожної ітерації початкові напрями обираються саме до неї. Завдання алгоритму полягає лише у відслідковуванні перетину траєкторії з «пагорбами» перешкод. У критичних випадках слід здійснювати їх обхід. На відміну від методу градієнтного спуску, тут можна обійтися без визначення похідних функції. На рис. 5 подані приклади отриманих траєкторій як ортогональних проєкцій на площину траєкторій кульки в залежності від положення стартової точки [5].

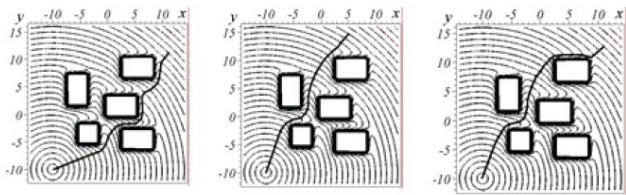


Рис. 5. Приклади траєкторій в залежності від положення стартової точки

Важливість побудованого алгоритму полягає в тому, що він дозволяє розташувати ітераційні точки приблизно на одній лінії, на відміну від відомих алгоритмів, де спостерігається «розкид» точок ітерації.

Таким чином, отримано вирішення питання розрахунку шляху переміщення точки між прямокутними перешкодами.

Трасування робота відбувається у вигляді кола серед чотирикутників. В реальних випадках необхідно враховувати габарити кола робота, і транспортний засіб слід розглядати не як точку, а як описане навколо неї коло. Тому постало завдання розрахунку смуг проходження габаритного кола серед перешкод [6].

Для цього необхідно розробити спосіб визначення відстаней між прямокутниками. Нехай задано два прямокутника, для яких за допомогою  $R$ -функцій складені рівняння  $f_1(X, y) = 0$  і  $f_2(X, y) = 0$ . Тоді відстань між прямокутниками дорівнює подвоєному мінімальному значенню  $R$ -кон'юнкції  $f_1$  і  $f_2$ .

На рис. 6, а наведено графіки функцій  $z = f_1(X, y)$  і  $z = f_2(X, y)$ . З огляду на трактування  $R$ -кон'юнкції з «освітленням» цих графіків, отримаємо графік  $R$ -кон'юнкції  $z = f_1 \wedge f_2$  (рис. 6, б).

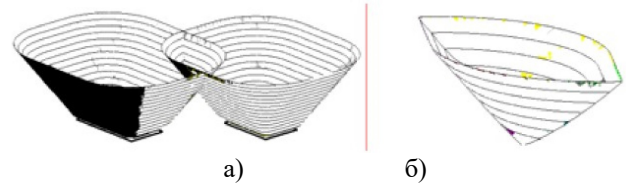


Рис. 6. Графіки функцій  $z = f_1(X, y)$  і  $z = f_2(X, y)$  (а) та графік  $R$ -кон'юнкції  $f_1(X, y)$  і  $f_2(X, y)$  (б)

Таким чином, в околиці обраного прямокутника можна побудувати в екстремальних точках відповідні гістограми відстаней до найближчих сусідніх прямокутників (рис. 7). Це важливо у ході вибору траси робота, коли необхідно враховувати не тільки траєкторію траси, а й габарити робота [7, 8].

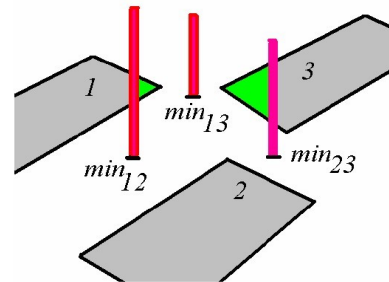


Рис. 7. Прямокутники з гістограмами відстаней

З використанням цієї ідеї в даній роботі запропоновано спосіб трасування робота з габаритним колом радіуса  $\epsilon$  між множиною прямокутників.

Нехай  $N$  прямокутників описано рівняннями  $f(x, y) = 0$ . Тоді трасу робота з габаритним колом радіуса  $\epsilon$  будемо визначати з ліній рівня  $R$ -диз'юнкції:

$$F(x, y) = \bigvee_{k=0}^N f_k(x, y)$$

Критерієм проходження траси є виконання нерівності:

$$F(x, y) < \epsilon.$$

Як приклад для прямокутників, розташованих згідно рис. 3, а, маємо графіки для сукупності прямокутників (рис. 8, а), а також графік  $R$ -диз'юнкції (рис. 8, б).

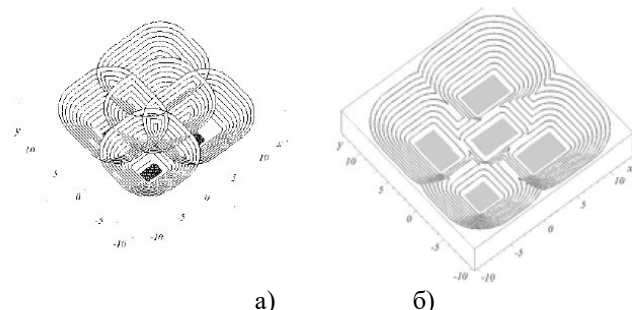


Рис. 8. Графік сукупності прямокутників (а) та графік  $R$ -диз'юнкції для цих прямокутників (б)

На рис. 9 наведені лінії рівня графіка  $R$ -диз'юнкції, які збігаються з допустимими шляхами руху робота в околиці сукупності прямокутників в залежності від величини габаритного кола радіуса  $\epsilon$ . Важливим тут є те, що траса визначається автоматично, без втручання оператора.

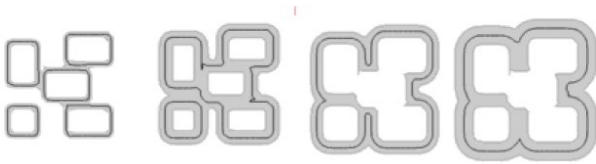


Рис. 9. Допустимі шляхи руху робота в залежності від кола радіуса  $\epsilon$

Таким чином, вирішено питання трасування траєкторії мобільного робота у вигляді габаритного кола серед чотирикутних перешкод за допомогою описаних смуг на площині.

Об'єднаємо спосіб трасування точки за графіком віртуальної потенційної функції, а також трасування габаритного кола за площиною. В результаті об'єднання отримуємо графік потенційної функції з виділеними на ньому смугами (рис. 10) [9, 10].

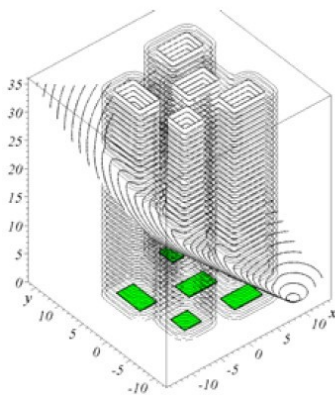


Рис. 10. Графік потенційної функції з циліндричними ортогональними поверхнями, що спираються на контури смуг на площині

Зазначені смуги отримують за допомогою циліндричних ортогональних поверхонь з направляючими – контурами смуг на площині. Тобто маємо графік потенційної функції, у якого смуги відповідають певним відстаням від прямокутників та окреслено циліндричними поверхнями, які спираються на відповідні колірні смуги площини (рис. 11).

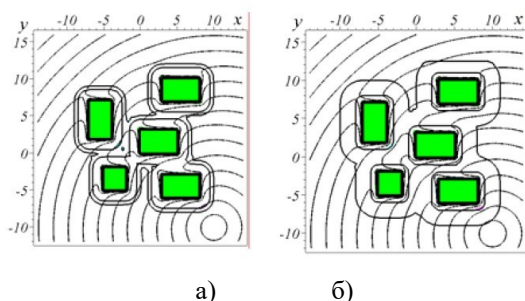


Рис. 11. Проекції смуг на графік потенційної функції для габаритного радіусу: малого (а) та великого (б)

## Висновки

В роботі описані методи визначення траєкторії переміщення мобільного робота по площині з перешкодами.

У якості перешкод використовуються прямокутники, які є проекцією на площину типового контейнера у формі паралелепіпеда.

Для вирішення поставленої задачі використовується навігаційна система, яка визначає власні координати робота, планує траєкторію в поточний момент часу і управляє його рухом.

На прикладі методу мінімізації функцій градієнтним спуском з постійним кроком розглянуто побудову траєкторії руху важкої кульки у полі «вертикального» тяжіння поверхнею графіка віртуальної потенційної функції в залежності від положення обраної стартової точки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Платонов А.К. Метод потенциалів в завданні прокладки траси. / А.К. Платонов, П. Карпов, А.А. Кирильченко. – М.: Препринт Ін-ту прикладної математики АН СРСР, 1974. – 27 с.
2. Васильєв М. Ю. Розвиток технології радіочастотної ідентифікації (RFID). / М. Ю. Васильєв // Економіка і менеджмент: Сб.статей. – СПб.: СПбГТУ (ТУ). – 2008. – Вип. 4. – 32-38с.
3. Морозова Г. В. Автоматичний вибір шляху руху робота за допомогою різновидів методу потенциалів / Г.В. Морозова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУСА. – 2009. – Вип. 82. – 283-389 с.
4. Морозова Г. В. Геометрична інтерпретація методу потенциалів для трасування шляху мобільного робота / Г. В. Морозова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА. – 2010. – Вип. 85. – 65-70 с /
5. Морозова Г.В. Вибір шляху робота між точками площини за умови обходу прямокутних перешкод / Г.В. Морозова // Геометричне і комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ. – 2010. – Вип. 27. – 93-98 с.
6. A new smith predictor for controlling a process with an integrator and long time delay / K. J. Astorm, C.C Hang, and B. C. Lim. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1994. -№39. - pp.343-345.
7. Control for integrating processes based on new modified smith predictor / Zhu Hongdong, Li Ruixia, Shao Huihe // Control 2004, University of Bath, UK – 2004.
8. Денисенко В.В. Комп'ютерне управління технологічним процесом, експериментом, обладнанням / Денисенко В.В. — М.: Горячая линия - Телеком, 2008 г. - 608 с.
9. Brunete A., Ranganath A., Segovia S., de Frutos J.P., Hernando M., Gambao E. Current trends in reconfigurable modular robots design. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, vol. 14 (3), pp. 1-21. <https://doi.org/10.1177/1729881417710457>
10. Demin A.V., Vityaev E.E. Adaptive Control of Modular Robots. In: A.V. Samsonovich and V.V. Klimov (eds.), Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists, Advances in Intelligent Systems and Computing 636, Springer, 2018, pp. 204-212. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63940-6\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63940-6_29).