

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-38>

УДК 681.5

ФЕДУЛА Микола
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-3765-2016>
ГУСАЧЕНКО Микола
Хмельницький національний університет

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ РОБОТІВ НА БАЗІ АЛГОРИТМУ САМООРГАНІЗАЦІЇ З ОЦІНКОЮ РІВНЯ ХАОСУ

Сучасний розвиток методів автоматизованого керування робототехнічними системами в умовах швидкого зростання їх кількості у всіх сферах господарства вимагає застосування нових алгоритмів побудови траєкторій та взаємодії між роботами в процесі їх руху. У випадках одночасному руху великої кількості роботів до різних цілей умови їх автоматизованого керування значно ускладнюються, що призводить до суттєвого зниження ефективності централізованих робототехнічних систем. Тому, з метою підвищення ефективності автоматизованого керування рухом великої кількості роботів у відносно обмеженому просторі вводяться методи та алгоритми самоорганізації.

Одним із найважливіших завдань самоорганізації руху роботів є спрощення алгоритму керування одним роботом у групі при одночасному підвищенні ефективності керування всією групою. Проте, вказане спрощення алгоритму керування одним роботом може призводити до виникнення неоднозначних умов, які ведуть до виникнення хаотичних режимів руху робота між різними цільовими точками.

Розглянуто процес самоорганізації руху роботів на базі методу потенціальних полів. Роботи рухаються за градієнтами до відповідних цільових точок притягання (потенціальних ям). Запропоновано метод автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу, що дозволяє коригувати траєкторії руху роботів з метою уникнення хаотичних режимів руху між різними цільовими точками. Оцінка рівня хаосу та плавна корекція траєкторій виконується в реальному часі та дозволяє уникати різкої зміни взаємного розташування роботів, що дозволяє підвищити точність та надійність функціонування робототехнічної системи, а також знизити ймовірність аварійних ситуацій.

Ключові слова: робототехніка, автоматизоване керування, самоорганізація, метод потенціальних полів, траєкторія, хаотичний рух.

FEDULA Mykola, HUSACHENKO Mykola
Khmelnyskyi Naional University

THE METHOD FOR AUTOMATED CONTROL OF ROBOT MOVEMENT BASED ON SELF-ORGANIZATION ALGORITHM WITH CHAOS LEVEL ESTIMATION

The modern development of methods for automated control of robotic systems in the conditions of their rapid growth in all economy spheres requires the using of new algorithms for constructing trajectories and interaction between robots during their movement. In cases of simultaneous movement of a large number of robots to different goals, the conditions for their automated control become significantly more complicated, which leads to a significant decrease in the efficiency of centralized robotic systems. Therefore, in order to increase the efficiency of automated control of the movement of a large number of robots in a relatively limited space, self-organization methods and algorithms are introduced.

One of the most important tasks of self-organization of robot movement is to simplify the control algorithm for one robot in a group while simultaneously increasing the efficiency of control of the entire group. However, the specified simplification of the control algorithm for one robot can lead to the emergence of ambiguous conditions that lead to the occurrence of chaotic modes of robot movement between different target points.

The process of self-organization of robot movement based on the potential field method is considered. The robots move along gradients to the corresponding target attraction points (potential wells). A method of automated robot motion control based on a self-organization algorithm with chaos level estimation is proposed, which allows correcting robot motion trajectories in order to avoid chaotic motion modes between different target points. The chaos level estimation and smooth trajectory correction are performed in real time and allow avoiding abrupt changes in the relative position of robots, which allows increasing the accuracy and reliability of the robotic system, as well as reducing the probability of emergency situations.

Keywords: robotics, automated control, self-organization, potential field method, trajectory, chaotic motion.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Метод потенціальних полів є одним із найбільш поширених та найбільш простих методів автоматизованого керування групами роботів на основі самоорганізації. Метод базується на визначенні потенціальних функцій, які утворюють віртуальні силові поля, за аналогією із законами фізики руху частинок у полі. Відповідно, вважається, що точка з цільовими координатами генерує притягуюче поле, а перешкода генерує відштовхуюче поле. Таким чином, кожен робот характеризується загальною потенціальною енергією відносно центрів притягування та перешкод. Зазвичай притягуючий потенціал характеризується як вектор різниці між цільовими та поточними координатами робота із відповідним ваговим коефіцієнтом (коефіцієнт притягування). Аналогічно визначається і відштовхуючий потенціал – із відповідним ваговим коефіцієнтом відштовхування.

Переваги методу потенціальних полів випливають із законів кінематики при мінімізації потенціалу робота методом градієнтного спуску, коли робот прямує від області із вищим потенціалом до області з нижчим потенціалом, і таким чином потрапляє у точку з цільовими координатами. При такому підході кожен робот приймає рішення локально, за результатами розрахунку власного градієнту. Вся робототехнічна система, організована таким чином, є розподіленою системою обчислень, що забезпечує великі можливості для масштабування із зростанням кількості роботів. Метод потенціальних полів характеризується простотою реалізації, оскільки для її ефективного функціонування необхідні тільки елементарні операції із градієнтами. Обчислення градієнтів відбувається локально, і вимоги до обчислювальної потужності кожного робота зазвичай не високі. Процес самоорганізації руху роботів за методом потенціальних полів є подібним до законів руху груп біологічних організмів, таких як косяки риб, зграї птахів або рої комах, які виникли в природі еволюційним шляхом, що доводить ефективність такого методу.

Слід зазначити, що метод потенціальних полів для самоорганізованого керування групами роботів має ряд проблем, які на даний час повністю не вирішені та вимагають подальшого дослідження. Серед таких проблем слід зазначити помилки, які виникають при наявності локальних мінімумів потенціального поля, а також ускладнення вимог до обчислювальних ресурсів при динамічній адаптації в умовах великого скупчення роботів.

Локальні мінімуми є найбільш поширеною проблемою методу потенціальних полів в умовах руху роботів по складній місцевості. Роботи можуть потрапляти в точки локальних мінімумів за методом градієнтного спуску, і зупинятися в цих точках. Така проблема методу ефективно вирішується шляхом введення додаткових логічних умов для аналізу і коригування цілей та відповідних потенціальних полів роботів. Проте, вирішення задачі автоматизованого керування роботом значно ускладнюється, якщо він не прямує до одного локального мінімуму, а розпочинає рухатися хаотично між двома або декількома локальними мінімумами. В такому випадку задача прийняття рішення роботом, який діє в самоорганізованій групі, значно ускладнюється внаслідок постійної плавної зміни його траєкторії, і необхідності аналізувати складні логічні умови з кожним кроком в реальному часі. Для вирішення такої проблеми у роботі запропоновано метод автоматизованого керування із оцінкою рівня хаотичності траєкторії робота в реальному часі, що дозволяє вчасно коригувати відображення для градієнтного спуску для уникнення переходу в хаотичний режим.

Застосування методів теорії хаосу та відповідних нелінійних ітеративних відображень дозволяє суттєво покращити характеристики руху роботів у потенціальному полі з локальними мінімумами шляхом уникнення їх переходу до хаотичних траєкторій. Згідно із оцінкою рівня хаотичності траєкторії рух робота може коригуватися шляхом введення невеликих поправок з кожною ітерацією автоматизованого керування його рухом без значного зростання вимог до обчислювальних ресурсів, що характерно для відомих методів на основі аналізу логічних умов.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розроблення методу автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Методи автоматизованого керування рухом роботів на основі самоорганізації є одними із найбільш актуальних напрямків наукових досліджень в сучасній робототехніці. Розвиток методів, що базуються на самоорганізації, надає нові можливості для підвищення ефективності колективного виконання завдань роботами у складних середовищах із динамічно змінними умовами. Зокрема, цікавими є явища виникнення хаотичних траєкторій руху роботів при використанні методу потенціальних полів. Перехід роботів до хаотичного руху в умовах великої групи, яка діє у складному середовищі відбувається плавно та “непомітно”, проте такі процеси можуть суттєво знижувати загальну ефективність групи внаслідок появи зайвих “петель” траєкторій роботів, що збільшують тривалість руху та витрату енергії. Таким чином, питання розроблення методів автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритмів самоорганізації із застосуванням теорії хаосу є актуальним та вимагає ґрунтовного дослідження.

У сфері методу потенціальних полів для самоорганізованого керування групами роботів виконано велику кількість наукових досліджень з різними умовами. Розглянемо основні напрями таких досліджень.

В роботах [1-4] описуються процеси флокінгу та колективної поведінки роботів. Вказані дослідження зосереджуються на теоретичних основах та практичних реалізаціях флокінгу в системах, до складу яких входить велика кількість роботів. Флокінг надає можливість великим групам роботів синхронно рухатися до цілі відповідно до заданих правил координації. Застосування потенціальних полів у таких методах є важливим для підтримання рівноваги між тяжінням до групи та уникненням зіткнень. Зокрема, у роботі [1] розглядаються сучасні стратегії флокінгу із врахуванням їх стабільності та ефективності. Відзначено важливу роль локальної інформації у забезпеченні координації руху роботів. Робота [3] аналізує

результати експериментів з мобільними роботами, які демонструють досягнення складних форм траєкторій в процесі самоорганізованого руху завдяки локальним взаємодіям.

У [5-8] описуються результати досліджень методів планування руху із застосуванням потенціальних полів та теорії хаосу. Хаотичні траєкторії призводять до додаткової непередбачуваності руху, що може бути як шкідливим так і корисним явищем у випадках, коли статичні алгоритми планування втрачають ефективність. У [8] описується підхід до хаотичного процесу планування шляхів для систем із багатьма роботами, що дозволяє уникати локальних мінімумів у потенціальних полях. Дослідження [5] показує покращення класичного методу потенціальних полів при обхіді перешкод шляхом введення нових потенціальних функцій, які враховують зміни середовищі з часом.

Публікації [9-12] акцентують увагу на проблематиці хаотичних траєкторій руху в мікророботах та нанороботах. Так у [10] виконано аналіз поведінки магнітних мікророботів, що виконують біомедичні маніпуляції за хаотичними траєкторіями. В [12] виконано аналіз застосування світла для формування біоміметичних траєкторій, що забезпечують можливості для керування рухом, коли класичні методи не мають належної ефективності.

Алгоритмічні підходи у моделюванні траєкторій руху роботів розглянуто в [13-18] на базі методу потенціальних полів. Вказані публікації показують покращення точності та надійності робототехнічних систем за рахунок інтеграції стохастичних методів та хаотичних траєкторій. Зокрема у [15] показано процес плавного планування траєкторій на основі теорії ймовірності, що дозволяє виконувати безпечний рух в складному середовищі.

Слід зазначити, що основні проблеми методу потенціальних полів пов'язані із наявністю локальних мінімумів, у яких роботи можуть “застрягати” або рухатися хаотично навколо них [4, 5, 19]. У складних системах із великою кількістю роботів координація руху також стає складнішою [19-23]. У роботах [2] та [8] описано методи масштабування алгоритмів для великих робототехнічних систем та роїв. У дослідженнях [5] та [13] приведено аналіз можливостей оптимізації таких систем для роботи в режимі реального часу.

Основною проблемою хаотичних траєкторій руху роботів є їх нестабільність, що значно ускладнює процес автоматизованого керування. Результати [4, 7, 24] демонструють засоби стабілізації подібних траєкторій.

Таким чином, останні публікації показують значний прогрес у сучасних методах автоматизованого керування групами роботів на базі самоорганізації і, зокрема, демонструють широкі можливості методу потенціальних полів для систем із великою кількістю роботів [1-4, 25]. Основними перевагами самоорганізації на основі методу потенціальних полів є адаптивність, можливості реалізації складного групового руху та ефективний обхід перешкод.

Однак, сучасні робототехнічні системи, що базуються на самоорганізації за методом потенціальних полів, вимагають подальшого розвитку в сферах масштабування, мінімізації обчислювального навантаження та стабілізації траєкторій.

Тому доцільно виконувати подальші дослідження процесів функціонування робототехнічних систем у режимах хаотичного руху [23-26], стабілізації хаотичних траєкторій та оптимізації методів забезпечення роботи систем у реальному часі. Вирішення вказаних задач дозволить створювати більш ефективні робототехнічні системи із вищими ступенями автономності.

Метод потенціальних полів для автоматизованого керування самоорганізованою групою роботів

Процес автоматизованого керування рухом групи роботів на основі самоорганізації за методом потенціальних полів складається з таких етапів:

- 1) кожен робот вважається точкою в n -вимірному просторі (як правило $n=2$ або $n=3$), із позицією, що залежить від часу t як $q_i(t) \in \mathbb{R}^n$, де $i=1, 2, \dots, N$;
- 2) на позицію робота впливає віртуальний потенціал $U_i(q_i)$, який є сумою притягуючих потенціалів цільових точок та відштовхуючих потенціалів від інших роботів та перешкод;
- 3) позиція кожного робота змінюється в часі, з рухом у напрямку градієнта потенціального поля з протилежним знаком;
- 4) числовий алгоритм керування роботом за методом потенціальних полів реалізується шляхом дискретизації часу із кроком Δt та ітеративного інтегрування рівнянь руху роботів.

Сформулюємо математичну модель потенціального поля. Нехай задано цільову точку $q_g \in \mathbb{R}^n$, до якої повинні наблизитися роботи. Розглянемо рух одного робота із номером i . Загальний потенціал, який діє на цього робота, складається з трьох компонентів:

- притягуючий потенціал цільової точки $U_n(q_i)$;
- відштовхуючий потенціал інших роботів $U_b^{(r)}(q_i)$;
- відштовхуючий потенціал перешкод $U_b^{(o)}(q_i)$;

Таким чином, загальний потенціал у точці розташування робота описується як сума (1):

$$U_i(q_i) = U_n(q_i) + U_b^{(r)}(q_i) + U_b^{(o)}(q_i). \quad (1)$$

Притягуючий потенціал цільової точки може описуватися в квадратичною функцією (2):

$$U_n(q_i) = \frac{\alpha}{2} |q_i - q_g|^2, \quad (2)$$

де $\alpha > 0$ — коефіцієнт, пропорційний віртуальній силі притягування до цілі. Мінімум цього потенціалу знаходиться у точці $q_i = q_g$, тобто коли робот потрапляє точно у цільову точку.

Відштовхуючий потенціал від інших роботів вводиться для уникнення зіткнень між роботами. Такий потенціал діє, якщо роботи занадто наближаються один до одного. Нехай мінімальна допустима відстань між роботами $d_0 > 0$. Тоді для двох роботів, номери яких i та j відповідно, відштовхуючий потенціал задається у формі виразу (3):

$$U_{ij}^{(r)}(q_i) = \begin{cases} \frac{\beta}{2} \left(\frac{1}{|q_i - q_j|} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & |q_i - q_j| < d_0 \\ 0, & |q_i - q_j| \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

де $\beta > 0$ — коефіцієнт, пропорційний віртуальній силі відштовхування між роботами. Тоді загальний відштовхуючий потенціал для робота i від усіх інших роботів визначається формулою (4):

$$U_b^{(r)}(q_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N U_{ij}^{(r)}(q_i). \quad (4)$$

де q_{obs_k} — позиція k -тої перешкоди, а d_{obs} — радіус дії відштовхування. В такому випадку отримуємо:

$$U_{ik}^{(o)}(q_i) = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{|q_i - q_{obs_k}|} - \frac{1}{d_{obs}} \right)^2, & |q_i - q_{obs_k}| < d_{obs} \\ 0, & |q_i - q_{obs_k}| \geq d_{obs} \end{cases} \quad (5)$$

де $\eta > 0$ — коефіцієнт відштовхування від перешкод у виразі (5). Загальний відштовхуючий потенціал від усіх перешкод розраховується за формулою:

$$U_b^{(o)}(q_i) = \sum_{k=1}^M U_{ik}^{(o)}(q_i). \quad (6)$$

Як результат, на основі формул (4), (5) та (6) отримуємо вираз (7) для визначення загального потенціалу поля у точці розташування одного робота:

$$U_i(q_i) = \frac{\alpha}{2} |q_i - q_g|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \max \left\{ 0, \frac{\beta}{2} \left(\frac{1}{|q_i - q_j|} - \frac{1}{d_0} \right)^2 \right\} + \sum_{k=1}^M \max \left\{ 0, \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{|q_i - q_{obs_k}|} - \frac{1}{d_{obs}} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

Напрямок руху робота на кожній ітерації обчислюється відповідно до методу градієнтного спуску. Робот повинен рухатися у напрямі зменшення потенціалу (8), тобто проти градієнту зростання потенціалу:

$$F_i = -\nabla U_i(q_i). \quad (8)$$

Таким чином, градієнт розраховується для кожної складової потенціалу в точці поточного розташування робота. Так градієнт притягуючого потенціалу визначається виразами (9) та (10):

$$\nabla U_g(q_i) = \alpha(q_i - q_g). \quad (9)$$

$$\nabla U_{ij}^{(r)}(q_i) = \beta \left(\frac{1}{|q_i - q_j|} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{(q_i - q_j)}{|q_i - q_j|^3}. \quad (10)$$

Аналогічно визначаються градієнти для перешкод та інших роботів. Тому загальний градієнт можна описати у формі (11):

$$\nabla U_i(q_i) = \alpha(q_i - q_g) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Gamma_{ij}(q_i) + \sum_{k=1}^M \Gamma_{ik}(q_i), \quad (11)$$

де $\Gamma_{ij}(q_i)$ та $\Gamma_{ik}(q_i)$ — відповідні градієнти відштовхуючих потенціалів.

Тепер сформулюємо модель руху робота. Для найпростішого випадку можна вважати, що робот змінює позицію пропорційно до сили або швидкості. Не враховуючи масу та інерцію, рух робота можна описати на основі кінематичної моделі (12):

$$\dot{q}_i = -K \nabla U_i(q_i), \quad (12)$$

де $K > 0$ — коефіцієнт, що визначає швидкість реакції робота на потенціальні сили.

Рівняння моделі руху робота розв'язується із застосуванням числового методу інтегрування. Застосовуємо метод Ейлера для дискретного часу з кроком Δt . Вважаючи, що q_i^k — позиція робота з номером i для кроку часу k , обчислюємо градієнт потенціалу:

$$g_i^k = \nabla U_i(q_i^k). \quad (13)$$

Далі, за формулою (14), визначаємо наступну позицію робота:

$$q_i^{k+1} = q_i^k - K g_i^k \Delta t. \quad (14)$$

Після цього знову розраховуємо потенціал $U_i(q_i^k)$ та його градієнт g_i^k , і оновлюємо позицію за формулою Ейлера, де величина $-K g_i^k$ задає рух робота проти градієнта, а коефіцієнт K визначає “агресивність” руху. Операцію повторюємо, поки роботи не наблизяться до цілі на достатньо малу відстань або поки не мине заданий час.

Описана числова форма методу потенціальних полів є практичною та дозволяє виконувати симуляцію самоорганізованого руху групи роботів. Результат симуляції самоорганізованого руху роботів, які керуються за вказаним методом потенціальних полів, зображено на рис. 1, де синіми точками показано початкові та кінцеві позиції роботів, а зеленими – цільові точки.

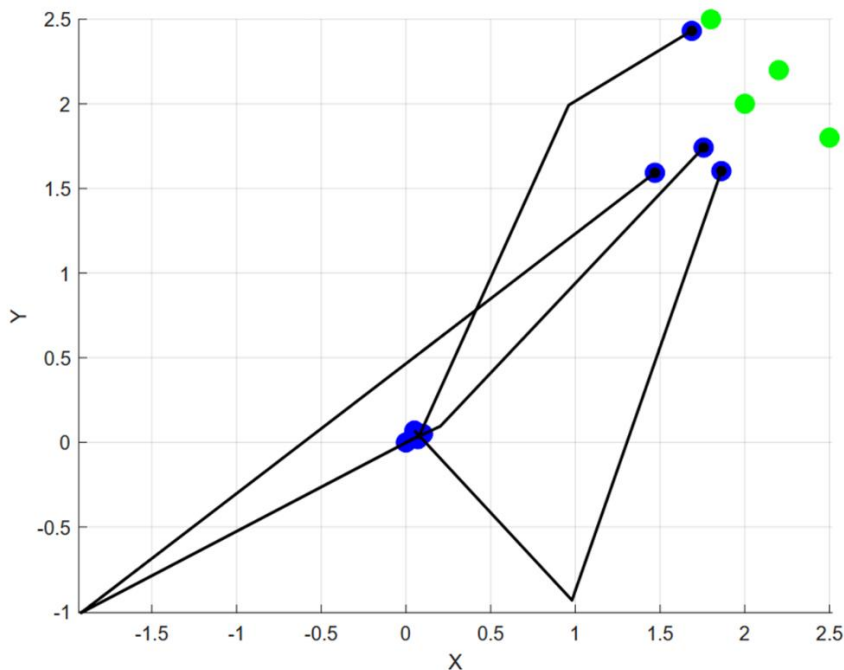


Рис. 1 Приклад самоорганізованого руху роботів, що керуються за методом потенціальних полів

З рис. 1 видно, що роботи розпочинають рух із стартової області, достатньо близько один від одного. Спочатку їх траєкторії розходяться в різні сторони під дією відштовхуючих потенціалів, а далі вони починають самоорганізовано наближатися до цілі. Слід зазначити, що початкове відштовхування роботів та швидкість зміни градієнту віртуальних полів суттєво залежать від коефіцієнтів кінематичних рівнянь та градієнтів, точне налаштування яких є окремим науковим завданням теорії автоматичного керування.

Модель хаотичного руху робота навколо цільових точок

Слід зазначити, що якщо один із роботів рухається, керуючись описаним вище методом потенціальних полів, то при наявності локальних мінімумів загального потенціалу може виникати неоднозначність умов керування, яка призводить або до зупинки робота в точці локального мінімуму, або до його переходу в хаотичний режим руху навколо двох або більшої кількості точок притягування.

Змодельємо ситуацію виникнення хаотичного руху робота навколо двох точок притягування. Проаналізуємо систему, в якій робот рухається під впливом потенціалу з двома симетричними мінімумами. Нехай дві цільові точки розташовані вздовж осі x з координатами $x = -a$ та $x = +a$, де $a > 0$. Обидві цілі мають однакові характеристики притягування, що створює подвійну потенціальну яму.

Сформуємо математичну модель такого потенціалу. Потенціал, який має два вказані симетричні мінімуми, описується формулою (15):

$$U(x) = \frac{\alpha}{2}(x^2 - a^2)^2, \quad (15)$$

де параметр $\alpha > 0$ задає глибину потенціальних ям. Цей потенціал має два мінімуми $x = \pm a$ та локальний максимум в точці $x = 0$.

Градієнт такого потенціалу із двома ямами визначається виразом:

$$\frac{dU}{dx} = \alpha(x^2 - a^2)x \quad (16)$$

Тоді рух робота, який керується методом потенціальних полів із градієнтним спуском, описується диференціальним рівнянням другого порядку (17), де для спрощення математичної моделі зовнішнє збурення внаслідок впливу інших роботів або зміни перешкод моделюється гармонійною функцією:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + \frac{dU}{dx}(x) = F \cos(\omega t) \quad (17)$$

де $d > 0$, коефіцієнт згасання, F та ω – відповідно амплітуда та циклічна частота зовнішнього впливу. Зовнішній вплив подібної форми може виникати, наприклад, якщо поблизу робота в групі рухаються один за одним ряд інших роботів із вищою швидкістю, кожен з яких по черзі “відштовхує”

даного робота. Підставивши градієнт потенціалу $\frac{dU}{dx}(x)$, отримаємо рівняння:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + \alpha(x^2 - a^2)x = F \cos(\omega t), \quad (18)$$

Для подальшого розв’язку рівняння (18) зручно перетворити в систему із двох диференціальних рівнянь першого порядку (19):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{-dv - \alpha(x^2 - a^2)x + F \cos(\omega t)}{m} \end{cases} \quad (19)$$

де $y = \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix}$ – вектор стану.

Тоді диференціальне рівняння можна подати в просторі станів у такій формі:

$$\dot{y} = f(y, t) = \begin{bmatrix} v \\ (-dv - \alpha(x^2 - a^2)x + F \cos(\omega t)) / m \end{bmatrix} \quad (20)$$

Диференціальні рівняння (20), які описують хаотичний рух, зазвичай не мають збіжного аналітичного розв’язку для хаотичних режимів, тому їх доцільно розв’язувати числовими методами. Розв’яжемо диференціальне рівняння траєкторії хаотичного руху робота числовим методом Рунге-Кутта 4-го порядку (21):

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\Delta t}{6} (c_1 + 2c_2 + 2c_3 + c_4), \quad (21)$$

де c_1, c_2, c_3, c_4 - додаткові коефіцієнти для інтерполяції розв’язку, за формулами (22) – (25):

$$c_1 = f(y(t), t) \quad (22)$$

$$c_2 = f\left(y(t) + \frac{\Delta t}{2} c_1, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (23)$$

$$c_3 = f\left(y(t) + \frac{\Delta t}{2} c_2, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (24)$$

$$c_4 = f\left(y(t) + \Delta t c_3, t + \Delta t\right) \quad (25)$$

На початку розв'язку диференційного рівняння задаємо масу m , демпфування d , параметри потенціалу α, a , зовнішні умови F, ω , крок інтегрування Δt та початкові умови $x(0) = x_0, v(0) = v_0$. Далі виконуємо ініціалізацію стану $y(0) = [x_0; v_0]$ для моменту часу $t = 0$. Після ініціалізації з кожним наступним кроком розраховуємо коефіцієнти c_1, c_2, c_3, c_4 за вказаними формулами та оновлюємо значення $y(t + \Delta t)$. Вказані ітерації розв'язку диференційного рівняння повторюємо, поки не буде виконано умову зупинки алгоритму.

Отримані точки траєкторії робота в часі можуть здійснювати рух достатньо складної форми. Змінюючи параметри моделі d, α, F, ω можна спостерігати різні режими – від періодичних коливань до детермінованого хаосу.

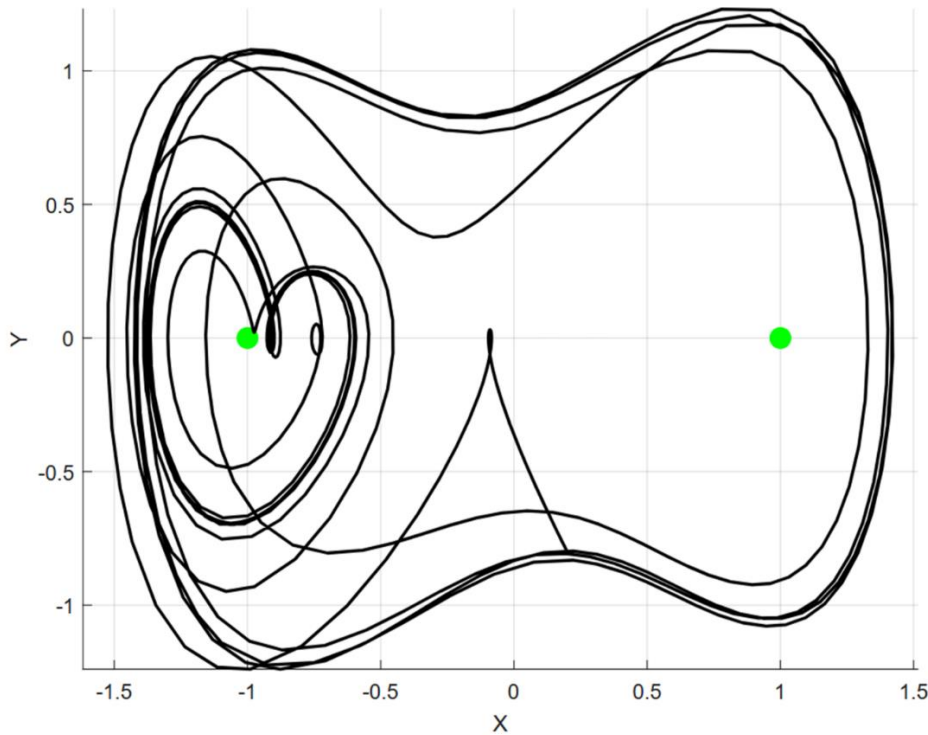


Рис. 2 Хаотична траєкторія робота у подвійній потенціальній ямі

Слід зазначити, що для отримання стійкої хаотичної траєкторії система повинна мати щонайменше дві потенціальні ями та достатню енергію від зовнішнього впливу (наприклад, від інших роботів), щоб переходити через потенціальний бар'єр. При великих тривалостях хаотичного руху зберігається висока чутливість до початкових умов, що є одним із основних факторів нестабільності руху такої групи роботів, яка може призводити до значних похибок та зниження загальної ефективності робототехнічної системи.

На практиці зовнішній вплив на робота від змінних в часі полів інших роботів, перешкод та цільових точок має достатню складну, псевдовипадкову або хаотичну форму. Тоді хаотична траєкторія робота може мати форму, складнішу, ніж зображена на рис. 2, але загальна закономірність зміни такого атрактора буде залежати переважно від потенціальних функцій найближчих цільових точок, тому аналіз вказаної траєкторії можна виконувати далі за методами, які ефективні для траєкторії з періодичним зовнішнім впливом, зображеної на рис. 2.

Метод автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу

З метою коригування траєкторії руху робота у групі, для уникнення переходу в хаотичний режим, необхідно оцінювати рівень хаосу на основі аналізу процесу відхилення траєкторії в реальному часі. При виконанні умов, що відповідають хаотичній формі траєкторії, необхідно здійснити керування параметрами системи для виходу з хаотичного режиму, змінюючи коефіцієнти рівнянь моделі та вводячи додаткові зміщення.

Розглянемо процес руху робота у потенціальному полі, яке має локальні мінімуми. Диференціальне рівняння руху робота (26) має вигляд:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + \frac{dU}{dx}(x, \delta) = F \cos(\omega t) \quad (26)$$

Для коригування траєкторії руху робота вводимо тимчасове додаткове зміщення (27) однієї з цільових точок (при умові, що робот ще не досягнув цієї цільової точки):

$$U(x, \delta) = \frac{\alpha}{2} [(x+a)^2 + (x-(a+\delta))^2], \quad (27)$$

де δ — невелика поправка до розташування другої цільової точки ($a > 0$, $\alpha > 0$).
Обчислимо похідну потенціалу (28):

$$\frac{dU}{dx}(x, \delta) = \alpha[(x+a) + (x-(a+\delta))] = \alpha(2x - \delta) \quad (28)$$

Таким чином, отримуємо рівняння руху (29):

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + \alpha(2x - \delta) = F \cos(\omega t) \quad (29)$$

Сформуємо модель (30) у просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{-dv - \alpha(2x - \delta) + F \cos(\omega t)}{m} \end{cases}, \quad (30)$$

Для коригування траєкторії руху робота використовуємо адаптивне керування за показником Ляпунова. Максимальний показник Ляпунова λ_{\max} визначається чисельно, в процесі інтегрування. Якщо $\lambda_{\max} > 0$, то робот рухається хаотично, і тому необхідно коригувати параметри δ та d .

Адаптацію параметрів руху робота здійснюємо за правилами (31) та (32):

$$\dot{\delta} = -\mu_{\delta} \lambda_{\max}, \quad (31)$$

$$\dot{d} = \mu_d \lambda_{\max}, \quad (32)$$

де $\mu_{\delta}, \mu_d > 0$ — малі коефіцієнти адаптації.

З метою оцінки λ_{\max} розглянемо дві траєкторії, що розпочинаються у близьких точках: $x(0), v(0)$ та $x(0) + \tau, v(0)$. Нехай базова траєкторія описується вектором стану $y(t) = [x(t); v(t)]$, а додаткова

траєкторія – вектором $y_{\delta}(t) = [x_{\delta}(t); v_{\delta}(t)]$, де $x_{\delta}(0) = x(0) + \tau$. Нехай величина $|\delta y(t)| = |y_{\delta}(t) - y(t)|$ зростає за законом $e^{\lambda_{\max} t}$. Тоді отримуємо оцінку (33) показника λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} \approx \frac{1}{t} \ln \frac{|y_{\delta}(t) - y(t)|}{\tau} \quad (33)$$

Таким чином, стан системи коригується за формулами (34) та (35):

$$x_{\delta}(t) = \tau \frac{x_{\delta}(t) - x(t)}{|x_{\delta}(t) - x(t)|} + x(t) \quad (34)$$

$$v_{\delta}(t) = \tau \frac{v_{\delta}(t) - v(t)}{|x_{\delta}(t) - x(t)|} + v(t) \quad (35)$$

Для числового інтегрування використовуємо метод Рунге-Кутта 4-го порядку. Вектор стану модифікованої системи описується виразом **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

$$Y = [x; v; \delta; d]$$

Тоді елементи вектора стану **Ошибка! Источник ссылки не найден.** розраховуються за формулами (36) – **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

$$f_x = v \quad (36)$$

$$f_v = \frac{-dv - \alpha(2x - \delta) + F \cos(\omega t)}{m} \quad (37)$$

$$f_{\delta} = -\mu_{\delta} \lambda_{\max} \quad (38)$$

$$f_d = \mu_d \lambda_{\max}$$

Далі виконуємо числове інтегрування ітеративно, з кожним кроком Δt за методом Рунге-Кутта четвертого порядку з коефіцієнтами **Ошибка! Источник ссылки не найден.** – (41):

$$c_1 = f(Y(t), t)$$

$$c_2 = f\left(Y(t) + \frac{\Delta t}{2} c_1, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (39)$$

$$c_3 = f\left(Y(t) + \frac{\Delta t}{2} c_2, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (40)$$

$$c_4 = f(Y(t) + \Delta t c_3, t + \Delta t) \quad (41)$$

Таким чином, розв'язок диференційного рівняння руху робота з коригуванням траєкторії описується ітеративним відображенням (42):

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + \frac{\Delta t}{6} (c_1 + 2c_2 + 2c_3 + c_4) \quad (42)$$

Аналогічно виконується інтегрування стану додаткової системи $[x_{\delta}; v_{\delta}]$ з тими самими визначеними параметрами $\delta(t), d(t)$.

Оновлення та перенормування λ_{\max} виконується кожні Δt_L сек. виконується за формулами (43) і (44):

$$\Delta x = x_o(t) - x(t), \quad (43)$$

$$\lambda_{\max}(t) = \frac{1}{t} \ln \frac{|\Delta x|}{T}. \quad (44)$$

В процесі коригування траєкторії руху робота показник λ_{\max} можна також усереднювати за декількома вимірюваннями, і далі виконувати додаткове нормування. Ітерації автоматизованого керування з коригуванням траєкторії повторюються до виходу з хаотичного режиму.

Траєкторію руху робота, отриману за розробленим методом автоматизованого керування на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу, зображено на рис. 3.

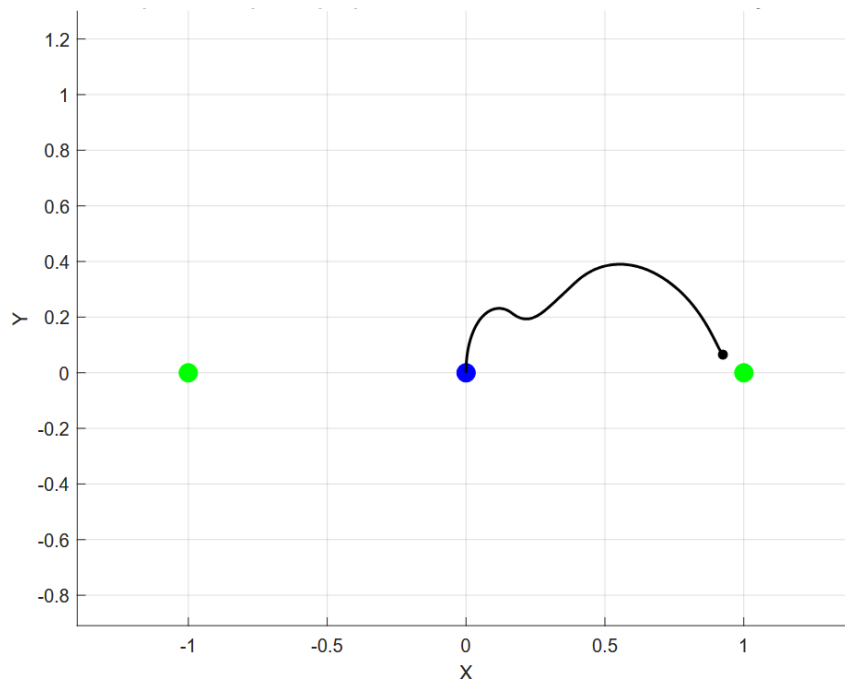


Рис. 3 Скоригована траєкторія робота

На рис. 3 зображено траєкторію руху робота, який розпочинає переходити у хаотичний режим (коливання поблизу синьої початкової точки), а далі траєкторія швидко коригується за розробленим методом на основі оцінки рівня хаосу, і робот наближається до цільової правої зеленої точки. Деяке спотворення траєкторії руху робота на рис. 3 присутнє внаслідок властивостей, притаманних методу потенціальних полів за умов наявності зовнішнього впливу на робота. Проте хаотичний режим руху не виникає, і робот наближається до цілі значно швидше та з меншими затратами енергії, ніж у випадку хаотичного руху навколо двох цільових точок.

ВИСНОВКИ З ПРОВЕДЕНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОЇ РОБОТИ

Проведені теоретичні дослідження та числові експерименти свідчать про суттєві переваги методів автоматизованого керування рухом роботів на основі алгоритмів самоорганізації в умовах складного середовища з цільовими точками та перешкодами. Одним із найбільш актуальних та ефективних серед них є метод потенціальних полів, який дозволяє отримувати достатньо ефективні самоорганізовані системи з відносно невисокими обчислювальними затратами. Основною проблемою методу потенціальних полів є наявність локальних мінімумів, які можуть призводити до помилок та зростання вимог до обчислювальної потужності одного окремого робота внаслідок ускладнення траєкторії руху.

Метод потенціальних полів проаналізовано в даній роботі в умовах виникнення хаотичного руху робота між двома точками притягування. Досліджено процес переходу до хаотичної траєкторії та відзначено негативні наслідки зростання довжини шляху робота за такою траєкторією.

Запропоновано оцінку рівня хаотичності траєкторії робота на основі показника Ляпунова, що дозволяє розвивати метод коригування траєкторії кожного робота в реальному часі при дотриманні загальних вимог до характеристик групового руху.

На основі результатів проведеного аналізу розроблено метод автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу, що дозволяє виконувати коригування траєкторії руху робота в реальному часі з метою уникнення неефективних хаотичних форм шляху робота. Розроблений метод автоматизованого керування рухом роботів на базі алгоритму самоорганізації з оцінкою рівня хаосу показує значне покращення характеристик траєкторії робота, що виявляється у відсутності хаотичного руху та досягненні цільової точки за набагато коротший період часу.

Література

- [1] F. Arvin, A. E. Turgut, S. Yue, State-of-the-Art Flocking Strategies for the Collective Motion of Multi-Robot Systems, *Machines*, vol. 12, no. 10, p. 739, October 2024.
- [2] M. Dorigo, M. Birattari, M. Brambilla, Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View], *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1152–1165, July 2021.
- [3] A. E. Turgut, H. Çelikkanat, F. Gökçe, E. Şahin, Self-organized flocking in mobile robot swarms, *Swarm Intelligence*, vol. 2, no. 2–4, pp. 97–120, December 2008.
- [4] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective, *Swarm Intelligence*, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, March 2013.
- [5] J. J. Cetina-Denis, R. M. López-Gutiérrez, C. Cruz-Hernández, and A. Arellano-Delgado, Design of a Chaotic Trajectory Generator Algorithm for Mobile Robots, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2587, March 2022.
- [6] S. S. Ge and Y. J. Cui, Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method, *Autonomous Robots*, vol. 13, pp. 207–222, November 2002.
- [7] W. Chen, X. Wu, and Y. Lu, An Improved Path Planning Method Based on Artificial Potential Field for a Mobile Robot, *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 15, no. 2, pp. 181–191, June 2015.
- [8] M. S. Couceiro, P. A. Vargas, R. P. Rocha, and N. M. F. Ferreira, Chaotic Path Planning for Multirobot Systems, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 559–563, July 2015.
- [9] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, H. A. Stone, Microscopic artificial swimmers, *Nature*, vol. 437, no. 7060, pp. 862–865, October 2005.
- [10] M. Koleoso, X. Feng, Y. Xue, Q. Li, T. Munshi, Micro/Nanoscale magnetic robots for biomedical applications, *Materials Today Bio*, vol. 6, p. 100046, March 2020.
- [11] H. Xin, N. Zhao, Yu. Wang, Xi. Zhao, T. Pan, Optically Controlled Living Micromotors for the Manipulation and Disruption of Biological Targets, *Nano Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 7178–7185, November 2019.
- [12] S. Palagi, A. G. Mark, Sh. Reigh, K. Melde, T. Qiu, Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots, *Nature Materials*, vol. 15, no. 6, pp. 647–653, June 2016.
- [13] M. Soullignac and P. Taillibert, Fast Trajectory Planning for Multiple Site Surveillance Through Moving Obstacles and Wind, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 10, pp. 772–781, October 2011.
- [14] N. Aspragathos and G. Dimitros, Collision Planner - A Probabilistic Single Stage Smooth Path Planner for Mobile Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 10, pp. 801–809, October 2011.
- [15] F. Karray and C. Silva, A Novel Approach to Path Planning for Autonomous Mobile Robots, *Control and Intelligent Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 83–90, 2011.
- [16] L. V. Nguyen, Swarm Intelligence-Based Multi-Robotics: A Comprehensive Review, *AppliedMath*, vol. 4, no. 4, p. 64, October 2024.
- [17] E. Bray R. Groß, Recent Developments in Self-Assembling Multi-Robot Systems, *Current Robotics Reports*, vol. 4, pp. 101–116, November
- [18] M. Rubenstein, A. Cornejo, R. Nagpal, Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm, *Science*, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, August 2014.
- [19] M. Kaynak, A. Ozelik, A. Nourhani, P. E. Lammert, V. H. Crespi, Acoustic actuation of bioinspired microswimmers, *Lab on a Chip*, vol. 20, no. 14, pp. 2755–2765, July 2020.
- [20] I. Zasornova, T. Hovorushchenko, M. Fedula, A. Hnatchuk. An information technology for joint decision making in machine embroidery with means of augmented reality. *CEUR-WS*. 2024. Vol. 3736. Pp. 93-111.
- [21] J. Meiss, "Dynamical Systems," *Scholarpedia*, vol. 2, no. 2, p. 1629, 2007.
- [22] R. D. Beer, "Biologically Inspired Robotics," *Scholarpedia*, vol. 4, no. 4, p. 1531, 2009.

- [23] M. Dorigo, M. Birattari, and M. Brambilla, Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View], Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1152–1165, July 2021.
- [24] M. Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, Programmable Self-Assembly in a Thousand-Robot Swarm, Science, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, August 2014.
- [25] Martynyuk V.V. The Analysis of Periodic Signal Detection Method Based on Duffing System Chaotic Dynamics // V.V. Martynyuk, Ye.V. Havrylko, J.M. Boiko, M.V. Fedula // Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2018, Iss. 73, pp. 5–10.
- [26] F. Kamil, Robotic Motion Planning in Unknown Dynamic Environments: Existing Approaches and Challenges, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1–15, 2017.

References

- [1] F. Arvin, A. E. Turgut, S. Yue, State-of-the-Art Flocking Strategies for the Collective Motion of Multi-Robot Systems, Machines, vol. 12, no. 10, p. 739, October 2024.
- [2] L. V. Nguyen, Swarm Intelligence-Based Multi-Robotics: A Comprehensive Review, AppliedMath, vol. 4, no. 4, p. 64, October 2024.
- [3] E. Bray R. Groß, Recent Developments in Self-Assembling Multi-Robot Systems, Current Robotics Reports, vol. 4, pp. 101–116, November
- [4] M. Dorigo, M. Birattari, M. Brambilla, Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View], Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1152–1165, July 2021.
- [5] M. Rubenstein, A. Cornejo, R. Nagpal, Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm, Science, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, August 2014.
- [6] A. E. Turgut, H. Çelikkanat, F. Gökçe, E. Şahin, Self-organized flocking in mobile robot swarms, Swarm Intelligence, vol. 2, no. 2–4, pp. 97–120, December 2008.
- [7] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, H. A. Stone, Microscopic artificial swimmers, Nature, vol. 437, no. 7060, pp. 862–865, October 2005.
- [8] M. Koleoso, X. Feng, Y. Xue, Q. Li, T. Munshi, Micro/Nanoscale magnetic robots for biomedical applications, Materials Today Bio, vol. 6, p. 100046, March 2020.
- [9] M. Kaynak, A. Ozcelik, A. Nourhani, P. E. Lammert, V. H. Crespi, Acoustic actuation of bioinspired microswimmers, Lab on a Chip, vol. 20, no. 14, pp. 2755–2765, July 2020.
- [10] I. Zasnornova, T. Hovorushchenko, M. Fedula, A. Hnatchuk. An information technology for joint decision making in machine embroidery with means of augmented reality. CEUR-WS. 2024. Vol. 3736. Pp. 93-111.
- [11] H. Xin, N. Zhao, Yu. Wang, Xi. Zhao, T. Pan, Optically Controlled Living Micromotors for the Manipulation and Disruption of Biological Targets, Nano Letters, vol. 19, no. 11, pp. 7178–7185, November 2019.
- [12] S. Palagi, A. G. Mark, Sh. Reigh, K. Melde, T. Qiu, Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots, Nature Materials, vol. 15, no. 6, pp. 647–653, June 2016.
- [13] J. Meiss, "Dynamical Systems," Scholarpedia, vol. 2, no. 2, p. 1629, 2007.
- [14] R. D. Beer, "Biologically Inspired Robotics," Scholarpedia, vol. 4, no. 4, p. 1531, 2009.
- [15] J. J. Cetina-Denis, R. M. López-Gutiérrez, C. Cruz-Hernández, and A. Arellano-Delgado, Design of a Chaotic Trajectory Generator Algorithm for Mobile Robots, Applied Sciences, vol. 12, no. 5, p. 2587, March 2022.
- [16] S. S. Ge and Y. J. Cui, Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method, Autonomous Robots, vol. 13, pp. 207–222, November 2002.
- [17] W. Chen, X. Wu, and Y. Lu, An Improved Path Planning Method Based on Artificial Potential Field for a Mobile Robot, Cybernetics and Information Technologies, vol. 15, no. 2, pp. 181–191, June 2015.
- [18] M. Dorigo, M. Birattari, and M. Brambilla, Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View], Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1152–1165, July 2021.
- [19] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective, Swarm Intelligence, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, March 2013.
- [20] M. Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, Programmable Self-Assembly in a Thousand-Robot Swarm, Science, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, August 2014.
- [21] Martynyuk V.V. The Analysis of Periodic Signal Detection Method Based on Duffing System Chaotic Dynamics // V.V. Martynyuk, Ye.V. Havrylko, J.M. Boiko, M.V. Fedula // Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2018, Iss. 73, pp. 5–10.
- [22] M. Soullignac and P. Taillibert, Fast Trajectory Planning for Multiple Site Surveillance Through Moving Obstacles and Wind, Robotics and Autonomous Systems, vol. 59, no. 10, pp. 772–781, October 2011.
- [23] N. Aspragathos and G. Dimitros, Collision Planner - A Probabilistic Single Stage Smooth Path Planner for Mobile Robots, Robotics and Autonomous Systems, vol. 59, no. 10, pp. 801–809, October 2011.
- [24] F. Karray and C. Silva, A Novel Approach to Path Planning for Autonomous Mobile Robots, Control and Intelligent Systems, vol. 39, no. 2, pp. 83–90, 2011.
- [25] F. Kamil, Robotic Motion Planning in Unknown Dynamic Environments: Existing Approaches and Challenges, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1–15, 2017.
- [26] M. S. Couceiro, P. A. Vargas, R. P. Rocha, and N. M. F. Ferreira, Chaotic Path Planning for Multirobot Systems, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 3, pp. 559–563, July 2015.