УДК 007.52, 62-523.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/25

Короленко Я.Р.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павловська Ю.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КРОКУЮЧОГО РОБОТА З НЕСПРАВНОЮ КІНЦІВКОЮ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Стаття присвячена побудові математичної моделі та моделювання руху крокуючого робота гексапода. В роботі був проведений огляд літературних джерел який виявив значну кількість робіт що присвячені даній тематиці. Існуючі дослідження показали, що для реального застосування запропонованих методичних та алгоритмічних розробок потрібен системний підхід, який дозволить сформувати адаптивний алгоритм керування рухом гексапода в невизначених умовах. Для реалізації такого алгоритму необхідно було створити математичну модель, яка буде враховувати особливості руху гексапода в умовах несправності/відмови однієї з кінцівок, дослідити кінематику руху гексапода, обрати алгоритми його стійкої ходи, промоделювати та дослідити його переміщення при пошкодженні або втраті кінцівки.

Для цього в статті були вирішені пряма й обернена задачі кінематики, що дозволили розрахувати координати точок контакту кінцівок із поверхнею руху та кути повороту базових суглобів гексапода для імплементації в алгоритм керування.

Всі розрахунки були проведені в середовищі MATLAB, що дозволило реалізувати поетапні розрахунки і візуалізацію скелетного вигляду гексаподу. Для більшої мобільності було обрано симетричну конструкцію корпусу у вигляді правильного шестикутника з розташованими на його вершинах кінцівками. Такий підхід дозволяє спростити розрахунки та збільшити кути повороту кінцівок в горизонтальній площині. Для переміщення гексапода обрано трипедальну ходу, для якої сформовано алгоритм переміщення та розраховано опорні точки у фазах опори та переносу. Запропоновано та обґрунтовано модифікацію алгоритму ходи при несправності/пошкодженні однієї з кінцівок, за умови збереження статичної стійкості робота при русі. Представлена візуалізація гексапода та результати моделювання руху крокуючого робота за запропонованим алгоритмом дають можливість оцінити зміни траєкторії руху робота при пошкодженні однієї з кінцівок, що може бути використано для відновлення чи корекції заданої траєкторії руху з мінімальними втратами часу.

Ключові слова: *моделювання, робот, гексапод, математична модель, центр мас, кінематика, пошкодження кінцівки, невизначені умови, MATLAB.*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день серед великого різноманіття конструкцій крокуючих роботів, найбільш розповсюдженими є роботи з шістьма кінцівками або гексаподи [1, 2]. Такі роботи мають численні переваги порівняно з іншими видами крокуючих платформ, серед них [3]:

– здатність легко утримувати рівновагу під час руху (мають статичну стійкість);

– висока прохідність та мобільність (можливість адаптуватися до різних нерівних поверхонь);

– завдяки відносно великій кількості опорних кінцівок, гексаподи можуть продовжувати виконання місії навіть у випадку втрати однієї або декількох кінцівок;

– здатність переміщуватись в будь-якому напрямку і менше залежати від умов оточуючого середовища, ніж роботи на колесах.

Ці особливості роблять їх ідеальними для виконання завдань, які вимагають певного рівня автономності та високої надійності в умовах руху місцевістю зі складним рельєфом поверхні.

Недоліками роботів гексаподів є надлишкова складність конструкції і поява додаткових ризиків, що пов’язані з відмовами керуючих та виконавчих елементів під час руху, особливо при русі на складних ділянках та з перешкодами. Більша кількість актуаторів призводить до збільшеного споживання енергії і, відповідно, до збільшення маси та габаритних розмірів самого робота. Крім того, для гексаподів характерним є ускладнення алгоритму керування рухом кінцівок у порівнянні, наприклад, із роботом з чотирма кінцівками. Окремо слід виділити проблему експлуатаційного пошкодження кінцівок, що виникає через пошкодження/втрату елементів конструкції або відмову/руйнування суглобів [4]. Все це обумовило значний науково-практичний інтерес до проблем вдосконалення гексаподів та систем керування для забезпечення їх надійного та стійкого руху в різних умовах функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед існуючих досліджень доцільно виділити напрямки, пов'язані з математичним описом та моделюванням крокуючих роботів, алгоритмами ходи, алгоритмами керування, поведінкою роботів та можливістю забезпечення їх стійкого руху в умовах невизначеності.

В статті [5] наведено детальний аналіз методів побудови кінематичних та динамічних моделей мобільних крокуючих роботів з використанням моделі Денавіта-Хартенберга. На думку авторів такий підхід обумовлює необхідність великої кількості арифметичних та тригонометричних операцій для опису переміщення однієї кінцівки крокуючого робота. Використання такої моделі для опису переміщення усіх кінцівок стає багатоетапним та трудомістким процесом. Автори запропонували альтернативний підхід на основі використання методів проективної геометрії, зокрема, графічного методу трикутників, що передбачає побудову кінцевої множини відповідних трикутників для кожного зчленування кінцівки крокуючого робота. Такий метод виглядає простішим та потребує меншої кількості обчислень, але він не є придатним для моделювання крокуючих роботів в умовах структурної та параметричної невизначеності, а також при нестаціонарних збуреннях середовища експлуатації об'єкта.

У існуючих прототипах крокуючих платформ багато уваги приділяють алгоритмам ходи та керуванням положенням самої платформи. В роботі [6] розроблено алгоритм повороту крокуючого робота на основі матриці стану кінцівок, що дає можливість за необхідності легко змінювати тип ходи. Запропоновано введення буферної матриці стану, яка дозволяє запам'ятовувати останнє положення кінцівок робота у випадку появи несправності, після ліквідації якої гексапод має можливість продовжити рух із довільного останнього стану, або повернутися у початкове положення та змінити маршрут.

В роботі [7] представлено підхід до розробки та керування реконфігурованими крокуючими роботами. Описано механічну структуру, основні кінематичні та динамічні залежності кінцівок робота. Систему керування розроблено у вигляді багаторівневого блоку на мікроконтролерах AVR Atmega8/16, які відповідають за формування траєкторії руху і водночас за керування всіма серводвигунами. Представлено розроблені різні алгоритми ходи та правила поведінки, включаючи рух вперед/назад, обхід перешкод, які забезпечують автономну роботу робота або дистанційне керування оператором. Крім того, під час руху алгоритми можуть зіставляти тип установок і ходу з навколишнім середовищем.

При зміні зовнішніх факторів і ландшафту, по якому рухається робот, виникає необхідність розробки принципово нових адаптивних алгоритмів керування, до яких відноситься і метод навчання з підкріпленням (Reinforcement learning або RL), який висвітлено у роботі [8], проте даний метод розглядався лише для колісних роботів.

В роботі [9] продемонстрована можливість крокуючого робота продовжувати рух при частковому пошкодженні кінцівок і після цього поновлювати до 96% своєї початкової швидкості. Застосування таких алгоритмів, безумовно, дуже ефективне, коли робот знаходиться в місцях, недоступних для його оперативного ремонту, на великих відстанях від бази, тощо, проте адаптація займає деякий час і потребує як додаткових обчислювальних потужностей, так і додаткових сенсорів для виявлення позаштатних ситуацій.

Проведений аналіз літературних джерел показав значний науковий та практичний інтерес до створення та вдосконалення крокуючих мобільних роботів. Проте недостатньо дослідженими є питання моделювання руху гексапода при структурній невизначеності, наприклад, при пошкодженнях кінцівок, які впливають на його рух або навіть унеможливлюють його. Через це постає необхідність розробки таких систем керування гексаподом, які б забезпечували можливість стійкого руху у разі непрацездатності чи втрати однієї з кінцівок.

Постановка завдання. Існуючі дослідження показали, що для реального застосування запропонованих методичних та алгоритмічних розробок потрібен системний підхід, який дозволить сформувати адаптивний алгоритм керування рухом гексапода в невизначених умовах. Для реалізації такого алгоритму необхідно створити математичну модель, яка буде враховувати особливості руху гексапода в умовах несправності/відмови однієї з кінцівок, дослідити кінематику руху гексапода, обрати алгоритми його стійкої ходи, промоделювати та дослідити його переміщення при пошкодженні або втраті кінцівки.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо конструкцію гексаподу тіло якого має форму правильного шестикутника, вписаного у коло радіусом R_0, а кінцівки розташовані на вершинах шестикутника і складаються з трьох суглобів, які з'єднані трьома ланками. Така конструкція тіла забезпечує можливість руху у довільному напрямі та миттєвої зміни напряму руху, а зазначена кількість ланок кожної кінцівки забезпечує стійкість та можливість переступати через відносно великі перешкоди. Схематичне зображення обраної конструкції, створене у середовищі MATLAB, наведено на рис. 1.

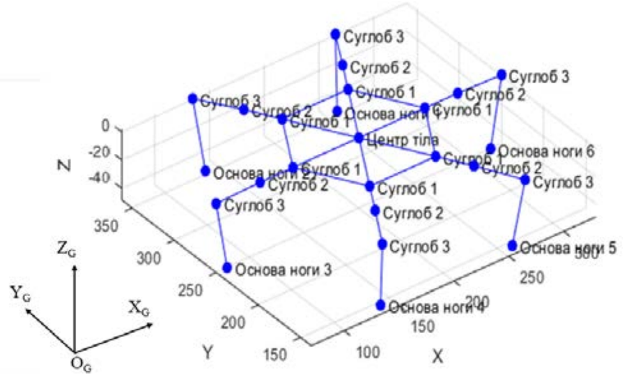


Рис. 1. Зображення обраної моделі гексаподу

Суглоб 1 кожної кінцівки обертається в площині тіла гексапода, а розташування цих суглобів на вершинах шестикутника забезпечує їм більший кут повороту. Суглоби 2 та 3 обертаються в площині, перпендикулярній площині тіла. Симетрична структура тіла дозволяє спрощувати моделювання і проводити його лише для однієї кінцівки.

Розглянемо географічну систему координат $O_GX_GY_GZ_G$, а з тілом гексапода пов'яжемо систему координат OXYZ, у точці O початку якої розмістимо геометричний центр тіла. Координати центру тіла у тривимірному просторі позначимо через O_x, O_y, O_z. Для побудови тіла гексаподу визначимо координати B_{xi}, B_{yi}, B_{zi} ($i=\overline{1,6}$) шести точок, в яких знаходяться вершини правильного шестикутника:

$$\begin{aligned} B_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x \\ B_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y \,, \\ B_{zi} &= O_z \end{aligned} \qquad (1)$$

де O_x, O_y, O_z – координати центру тіла; φ_i – кут нахилу прямої, проведеної від центру тіла до i-тої вершини шестикутника, до осі абсцис; R_0 – радіус кола, в яке вписано шестикутник, відстань від центра тіла до i-тої вершини.

Розглянемо пряму задачу кінематики, згідно з якою за умови заданих кутів обертання суглобів та відомих довжинах ланок кінцівки визначимо координати суглобів та координату точки контакту кінцівки з поверхнею руху, використовуючи наведену в [3, 10] модель кінцівки.

Як показано на рис. 1, кожна кінцівка моделі гексаподу складається з трьох суглобів і трьох ланок довжиною l_1, l_2, та l_3. Суглоб 1 приєднаний до тіла гексаподу і забезпечує поворот кінцівки навколо вертикальної осі Z на кут α. Позначимо кути поворотів Суглобу 2 та Суглобу 3 навколо горизонтальних осей (в площині, перпендикулярній тілу гексаподу) відповідно β та γ. Координати i-тої вершини тіла (1) є координатами відповідного Суглобу 1. Суглоб 2 позначимо точкою C з координатами у тривимірному просторі C_{xi}, C_{yi}, C_{zi}, які з урахуванням повороту кінцівки Суглобом 1 навколо вертикальної осі на кут α та кута φ_i визначаємо за виразами:

$$C_{xi} = B_{xi} + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) \;\; C_{yi} = B_{yi} + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha)$$

$$C_{zi} = B_{zi} \qquad (2)$$

а з урахуванням виразів (1):

$$C_{xi} = R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha)$$

$$C_{yi} = R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) \;\; C_{zi} = O_z \qquad (3)$$

Схематично це показано на рис. 2.

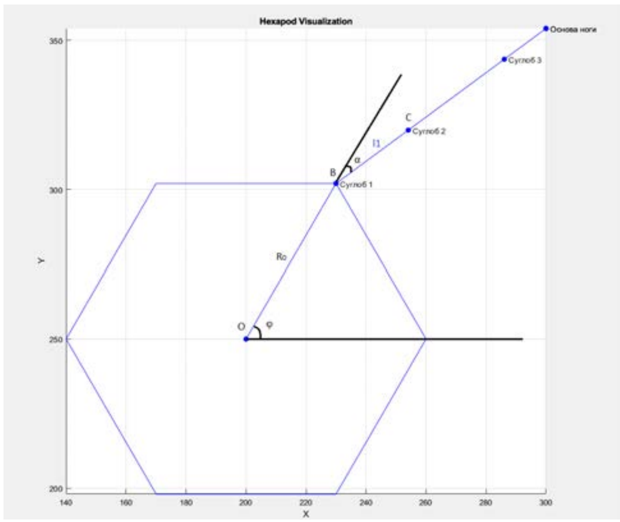


Рис. 2. Схематичне зображення гексаподу з однією кінцівкою для визначення координат Суглобу 2

Суглоб 3 позначимо точкою D з координатами D_{xi}, D_{yi}, D_{zi}, які за відомими координатами точки C та кутом β нахилу ланки l_2 відносно площини, в якій знаходиться тіло гексаподу, визначаємо за виразами:

$$D_{xi} = C_{xi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{yi} = C_{yi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) \quad D_{zi} = C_{zi} + l_2 \cdot \sin(\beta),$$

а з урахуванням (3) отримаємо:

$$D_{xi} = R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{yi} = R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{zi} = O_z + l_2 \cdot \sin(\beta). \qquad (4)$$

Точку контакту основи кінцівки з поверхнею позначимо E, і відповідно до схематичного зображення на рис. 3 гексаподу з однією кінцівкою у площині, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить через всі три суглоби і ланки, запишемо вирази для визначення координати точки контакту кінцівки з поверхнею руху:

$$E_{xi} = R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) \cdot$$
$$+ l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma)$$

$$E_{yi} = R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) +$$
$$+ l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma) \cdot$$
$$E_{zi} = O_z + l_2 \cdot \sin(\beta) + l_3 \cdot \sin(\beta + \gamma). \qquad (5)$$

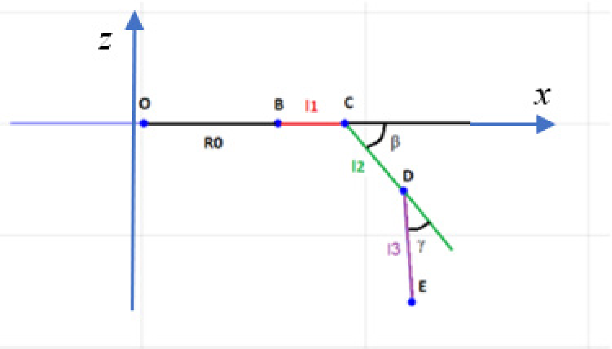


Рис. 3. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою у площині, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить через всі три суглоби і ланки

Розглянемо задачу зворотної кінематики [10, 11], тобто визначимо кути α, β та γ при відомих координатах опорних точок кінцівок гексапода. Нехай координати основи i-тої кінцівки визначені як (E_{xi}, E_{yi}), а кут повороту навколо осі Z визначається як (φ_i-α). Кут (φ_i-α) обчислюється як арктангенс відношення різниці координат Суглобу 1 та основи кінцівки за віссю Y до різниці їх координат за віссю X:

$$\varphi_i - \alpha = \arctan(a_i / b_i) \quad a_i = E_{yi} - B_{yi}$$
$$b_i = E_{xi} - B_{xi} \qquad (6)$$

З рівнянь (6) визначаємо кут α:

$$\alpha = \varphi_i - \arctan(E_{yi} - B_{yi} / E_{xi} - B_{xi}). \qquad (7)$$

Для визначення кутів β та γ розглянемо площину, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить через два суглоби (Суглоб 2, точка C і Суглоб 3, точка D), дві ланки l_2 і l_3 та основу кінцівки з точкою E її контакту з поверхнею руху (рис. 4).

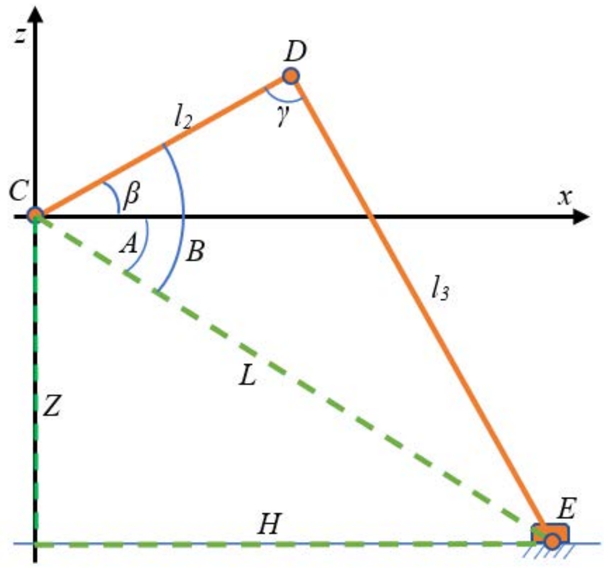


Рис. 4. Графічна схема для розрахунку кутів β та γ

Тоді з наведеної графічної схеми визначимо:

$$H = \sqrt{(E_x - C_x)^2 + (E_y - C_y)^2}; \qquad (8)$$

$$L = \sqrt{H^2 + (E_z - C_z)^2}; \qquad (9)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - L^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) \qquad (10)$$

$$B = \arccos\left(\frac{L^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot L \cdot l_2}\right); \qquad (11)$$

$$A = \mathrm{arctg}(Z / H); \qquad (12)$$

$$\beta = B - A. \qquad (13)$$

Як результат, при подачі на вхід комплексу кінематичних рівнянь (7)–(13) бажаного положення кінцівки гексаподу ми отримуємо кути, на які необхідно провернути суглоби для переміщення основи кінцівки в бажане положення.

Оскільки конструкція симетрична, то наведені кінематичні рівняння будуть актуальними для будь-якої кінцівки гексапода і будуть відрізнятись лише станом, в якому буде знаходитись кожна кінцівка в певний момент часу. Більш детально розрахунки скелетних точок гексапода (координат та кутів повороту) висвітлено в роботі [10].

Цикл руху кінцівки, що складається з підйому і фіксації в певному стійкому положенні, включає дві фази: фазу переносу (переміщення кінцівки в повітрі з початкового в кінцеве положення) та фазу опори (основа кінцівки контактує з поверхнею руху) [12].

Стійкість крокуючих роботів поділяється на статичну та динамічну стійкість. Для забезпечення статичної стійкості робот повинен бути стійким протягом усього циклу ходи, без необхідності застосування будь-якої сили для балансування [10]. Поки робот статично стійкий, вертикальна проекція його центру мас (ЦМ) знаходиться в межах опорного багатокутника, який утворюється між кінцівками, що знаходяться у фазі опори. При виході ЦМ на межу або за межі опорного багатокутника робот падає, якщо він не є динамічно стійким, тобто робот збалансований під час ходьби за рахунок інерції, обумовленої рухом, і стає статично нестійким, коли припиняє рух. В залежності від обраного типу ходи статична та динамічна стійкість, а також швидкість переміщення роботів суттєво відрізняються [13, 14], тому в даній роботі розглядається трипедальна хода робота, як оптимальний варіант за параметрами швидкості та стійкості. На рис. 5 показано опорний полігон моделі гексаподу під час трипедальної ходи, де червоне коло позначає вертикальну проекцію його загального ЦМ, який знаходиться в межах червоного опорного трикутника. Для досягнення статичної стійкості при проектуванні послідовності фаз руху для гексаподу необхідно утримувати центр мас гексапода всередині опорного трикутника.

Послідовність чергування фаз переносу та опори для кожної кінцівки, яка забезпечує статичну стійкість гексаподу, показано на рис. 6а, де темний колір позначає фазу опори, а світлий – фазу переносу. Така послідовність є характерною для крокуючого робота у бездефектному стані, коли всі кінцівки працездатні і працюють безвідмовно протягом встановленого терміну руху. Але в реальних умовах руху по місцевості зі складним профілем поверхні частою подією є несправність, пошкодження чи втрата однієї з кінцівок, що вимагає аналізу поведінки крокуючого робота в такій ситуації. Вважаємо, що кінцівка, що стала несправною, не заважає руху іншим кінцівкам. Модифікуємо алгоритм трипедальної ходи з врахуванням того, що для стійкості необхідно забезпечити, щоб три кінцівки знаходились у фазі опори і утримували тіло робота, а дві кінцівки в цей час знаходились у фазі переносу, як це показано на оновленій діаграмі на рис. 6б. Очевидно, що при несправності/пошкодженні однієї кінцівки кількість рухів при виконанні одного переміщення буде відрізнятись, що призведе до зменшення швидкості.

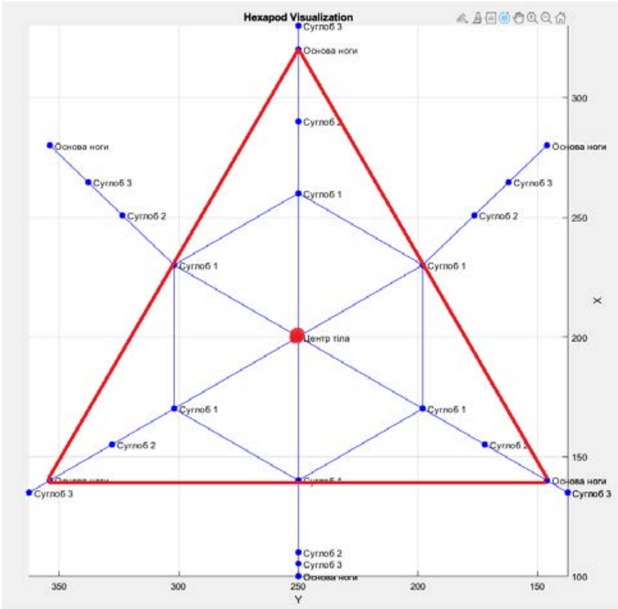
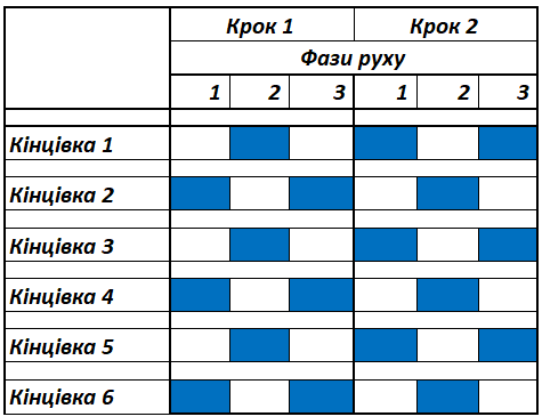
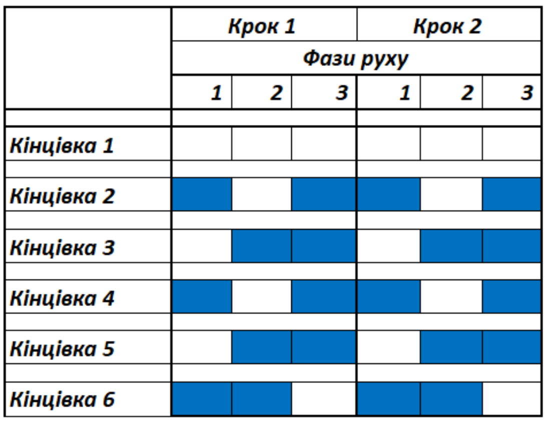


Рис. 5. Вид зверху опорного трикутника гексапода



а)



б)

Рис. 6. Послідовність фаз переносу і опори при трипедальній ході: а) всі кінцівки бездефектні; б) при пошкодженні кінцівки 1

При підйомі кінцівки, яка знаходиться поряд із пошкодженою, центр мас буде зміщуватись за межі опорного трикутника і робот втратить статичну стійкість. Тому, як видно з рис. 6б, необхідною умовою є формування додаткової точки опори, що дещо модифікує трипедальну ходу, зокрема, в третій фазі руху гексапод матиме чотири точки опори, а оцінка стійкості буде відбуватись вже по опорному чотирикутнику (рис. 7).

Для моделювання прямих та зворотніх рівнянь кінематики в середовищі MATLAB було розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, яке дозволяє формувати алгоритм руху гексапода при різних умовах, блок-схему алгоритму наведено на рис. 8. За одне повне проходження алгоритму визначається положення всіх базових вузлів гексаподу, обраховується нове положення центру мас, ці данні є початковими вхідними даними для наступної ітерації.

Розглянемо основні блоки наведеного алгоритму. Блок вхідних даних містить в собі всі дані, які відомі про модель гексаподу від початку моделювання: геометричні розміри гексаподу; початкове положення центру мас тіла; бажане переміщення центру мас за один цикл руху гексаподу; послідовності фаз переносу та опори для усіх кінцівок гексаподу. Після закінчення циклу руху положення тіла оновлюється та візуалізується, як на рис. 1. Блок визначення необхідного положення кінцівки отримує вхідні дані і на основі необхідного значення переміщення центра мас тіла обраховує можливе положення кінцівок гексаподу для здійснення цього переміщення за один цикл. Також враховується послідовність руху кінцівок таким чином, що обраховуються значення лише для кінцівок, що будуть знаходитись в фазі переносу, інші параметри залишаються незмінними, що зменшує навантаження на обчислювач. Схему роботи блоку наведено на рис. 9.

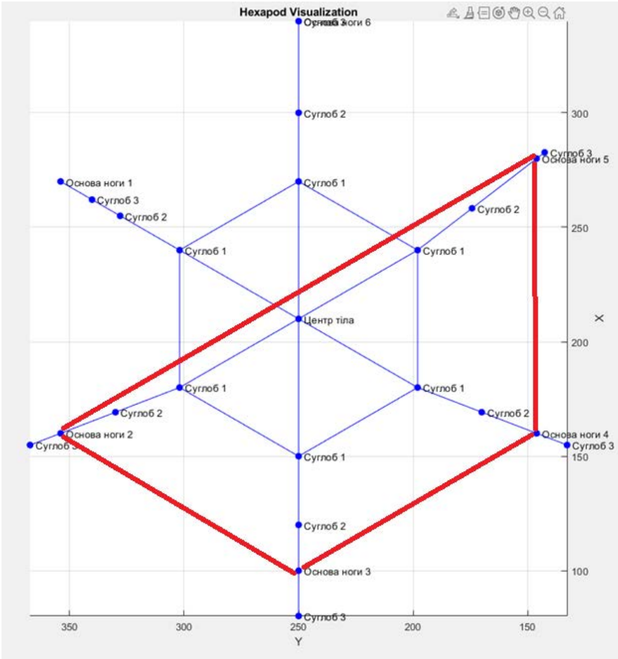


Рис. 7. Опорний чотирикутник для третьої фази в циклі руху

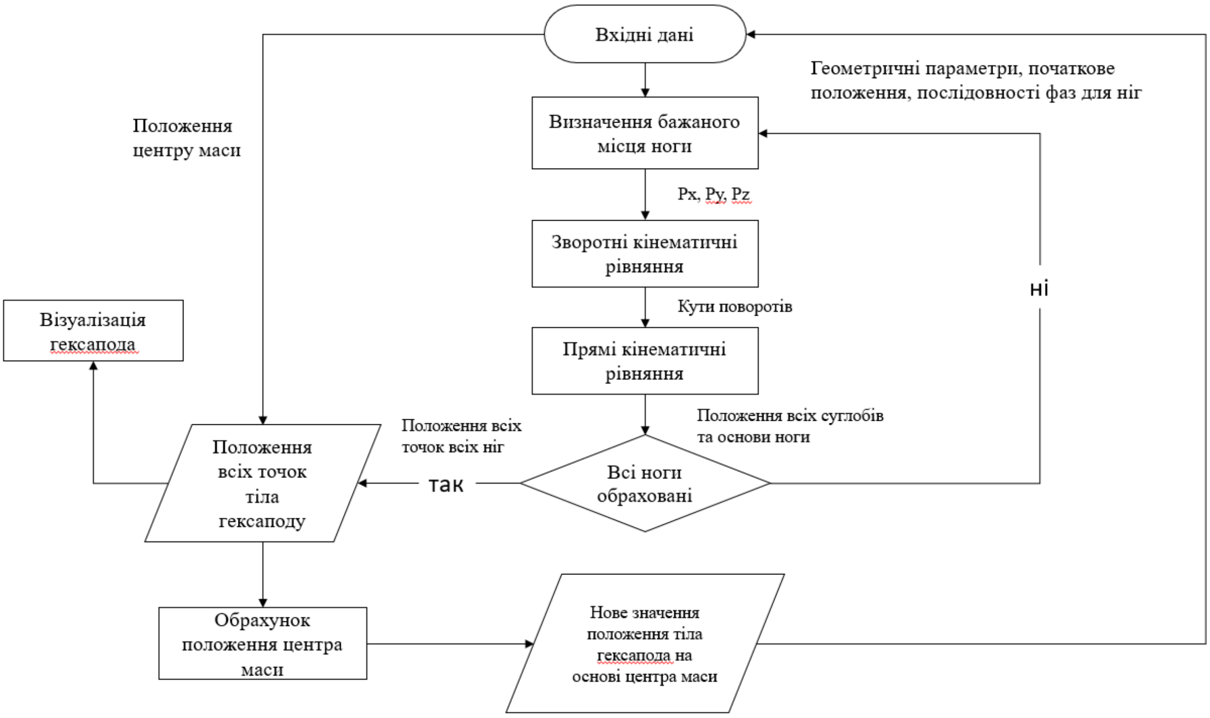


Рис. 8. Блок-схема алгоритму моделювання руху гексаподу

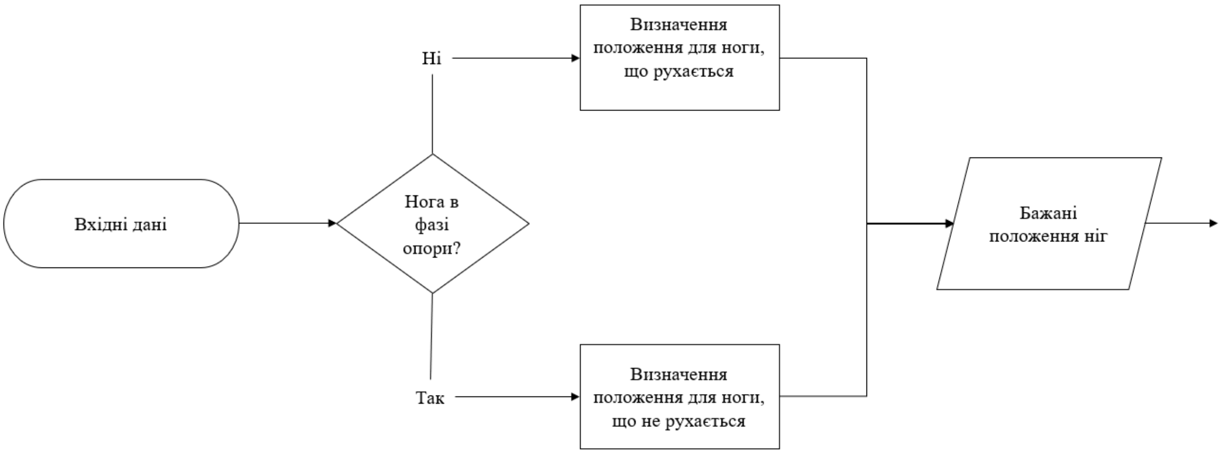


Рис. 9. Схема роботи блоку визначення бажаного положення кінцівок

На виході блоку (рис. 10) отримуємо координати положення, в яке потрібно перемістити основу кінцівки, які далі надходять до блоку зворотних кінематичних рівнянь разом з вхідними даними про габаритні розміри та початкове положення гексаподу. На основі рівнянь (6)–(13), які і складають даний блок, на виході блоку отримуємо значення кутів α, β, γ, їх значення далі передаються до блоку прямих кінематичних рівнянь, які визначають положення кожного суглобу та координат ланок, на виході блоку отримуємо повну інформацію про положення суглобів та основи кінцівки у просторі.

Описана процедура розрахунку повторюється для кожної кінцівки, після цього повний масив даних передається до блоку візуалізації гексапода. Програма у середовищі MATLAB візуалізує гексапод у скелетному вигляді, з'єднуючи вузли тіла гексапода [10].

Дані про положення всіх вузлів гексаподу передаються до блоку обрахунку центра мас, який обчислює центри мас окремих кінцівок гексаподу та всього гексаподу. В результаті визначається поточне положення центру мас гексаподу у просторі, яке передається на вхідні дані, де воно стає новим початковим положенням, таким чином завершуючи цикл руху. Кожне положення центру мас записується у вектор значень, який потім використовується для побудови графіку переміщення гексаподу, що необхідно для подальшого аналізу руху гексапода, наприклад, при несправності/пошкодженні кінцівки. На рис. 10 наведено графік траєкторії руху центру мас гексаподу при пошкодженій 1й кінцівці та запланована траєкторія руху. Як видно з наведеного результату моделювання, рух гексаподу залишається прямолінійним, але несправність/пожкодження кінцівки призводить до зміщення траєкторії руху в бік пошкодженої кінцівки відносно запланованої траєкторії.

Результати моделювання дають можливість оцінити зміщення траєкторії та обрати метод для відновлення траєкторії руху для досягнення заданих координат під час руху з мінімальними втратами часу.

Висновки. Дана робота присвячена розробці математичної моделі та моделюванню крокуючого робота (гексапода) при невизначених умовах, наприклад таких, як пошкодження елементів робота, що при звичайних умовах призводить до неможливості виконання місії. Для цього в статті були вирішені пряма й обернена задачі кінематики, що дозволили розрахувати координати точок контакту кінцівок із поверхнею руху та кути повороту базових суглобів гексапода для імплементації в алгоритм керування.

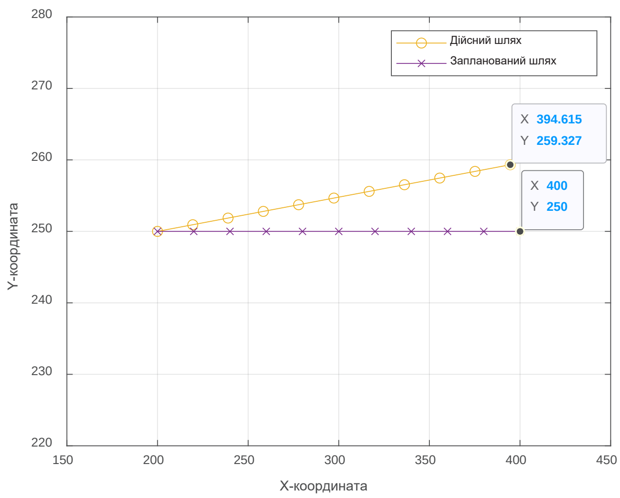


Рис. 10. Графік переміщення центра мас гексаподу при пошкодженій кінцівці 1

Всі розрахунки були проведені в середовищі MATLAB, що дозволило реалізувати візуалізацію скелетного вигляду гексаподу. Для більшої мобільності було обрано симетричну конструкцію корпусу у вигляді правильного шестикутника з розташованими на його вершинах кінцівками. Такий підхід дозволяє спростити розрахунки та збільшити кути повороту кінцівок в горизонтальній площині. Для переміщення гексапода обрано трипедальну ходу, для якої сформовано алгоритм переміщення та розраховано опорні точки у фазах опори та переносу. Запропоновано та обгрунтовано модифікацію алгоритму ходи при несправності/пошкодженні однієї з кінцівок, за умови збереження статичної стійкості робота при русі. Представлена візуалізація гексапода та результати моделювання руху гексаподу за запропонованим алгоритмом дають можливість оцінити зміни траєкторії руху робота при пошкодженні однієї з кінцівок, що може бути використано для відновлення чи корекції заданої траєкторії руху з мінімальними втратами часу.

Список літератури:

1. Rubio F, Valero F, Llopis-Albert C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019;16(2). doi:10.1177/1729881419839596

2. Lyashenko V., Ahmad M. Ayaz, Belova N, Sotnik S. Modern Walking Robots: A Brief Overview. *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, 2021. Vol 3, No. 2, P. 32-39. DOI: 10.36079/lamintang.ijortas-0302.252

3. Urrea C, Valenzuela L and Kern J (2016) Design, Simulation, and Control of a Hexapod Robot in Simscape Multibody. Applications from Engineering with MATLAB Concepts. in Tech. Available at: http://dx.doi.org/10.5772/63388.

4. Zhijun C., Qingxing X. Fault-tolerant gait design for quadruped robots with one locked leg using the GF set theory. Mechanism and Machine Theory. 2022, 178 (19–20):105069. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2022.105069

5. Хазанович Ю.Ю., Киричук Ю.В., Черепанська І.Ю. Метод визначення положення кінцівок крокуючого мобільного роботу у просторі. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2023. Том 34 (73). №1. С. 136-143. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/21

6. Платов І.М., Павловський О.М., Павловська Ю,О. Алгоритми руху гексапода для оминання перешкод. Кутовий рух, *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, 2021. Вип. 62(2), С. 58-64. DOI: https://doi.org/10.20535/1970.62(2).2021.249214

7. Krenich S., Urbanczyk M. Six-legged walking robot for inspection tasks. *Solid State Phenomena*, 2011. Vol. 180. P. 137-144. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.180.137

8. Удовенко С. Г. Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением. *Системи обробки інформації*, 2016. № 8(145). С. 56-62.

9. Cully, A., Clune, J., Tarapore, D. et al. Robots that can adapt like animals. *Nature.* 2015. № 521, 503-507. https://doi.org/10.1038/nature14422.

10. Короленко Я. Р. Робастна система керування рухом крокуючого мобільного робота/ 2024. *Магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*. 124 с.

11. Robot Inverse Kinematics With A Hexapod Leg. JustAnotherMakerChannel. 2023. – URL: http://surl.li/ktrcdt.

12. Gurel C. Hexapod Modelling, Path Planning, and Control. [Електронний ресурс]. Canberk Suat. Gurel. ResearchGate. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/320386792_Hexapod_Modelling_Path_Planning_and_Control#pf34.

13. Ramdya, P., Thandiackal, R., Cherney, R. et al. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits. *Nat Commun.* 2017. №8. 14494 http://dx.doi.org/10.1038/ncomms14494.

14. Платов І., Павловський О. Алгоритм руху автономного робота – гексапода для переміщення у вузьких замкнутих просторах. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*. 2021. №61(1). Pp. 61-68. https://doi.org/10.20535/ 1970.61(1).2021.237103

Korolenko Ya.R., Pavlovska Yu.O. SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A WALKING ROBOT WITH A DAMAGED LIMB IN MATLAB

The article is dedicated to the development of a mathematical model and simulation of the movement of a hexapod walking robot. A review of literature sources was conducted, revealing a significant number of studies on this topic. Existing research has shown that for the practical application of the proposed methodological and algorithmic developments, a systematic approach is required. This approach would allow the formation of an adaptive control algorithm for the hexapod's movement in uncertain conditions. To implement such an algorithm, it was necessary to create a mathematical model that accounts for the hexapod's movement in the *event of malfunction or failure of one of its limbs, to study the kinematics of the hexapod's movement, select algorithms for stable walking, and simulate and investigate its movement when a limb is damaged or lost.*

To achieve this, the article solves both direct and inverse kinematics problems, enabling the calculation of the contact points of the limbs with the surface and the rotation angles of the hexapod's base joints for implementation in the control algorithm. All calculations were carried out in the MATLAB environment, which made it possible to implement step-by-step calculations and visualize the skeletal structure of the hexapod. For greater mobility, a symmetrical body design in the form of a regular hexagon with limbs positioned at its vertices was chosen. This approach simplifies the calculations and increases the rotation angles of the limbs in the horizontal plane. A tripod gait was chosen for the hexapod's movement, and an algorithm for movement was developed along with the calculation of support points in the support and transfer phases. A modification of the gait algorithm was proposed and justified in the event of a limb malfunction or damage, provided that the robot maintains static stability during movement. The presented visualization of the hexapod and the results of the walking robot's movement simulation based on the proposed algorithm allow for the assessment of trajectory changes when a limb is damaged. This can be used to restore or correct the predefined movement trajectory with minimal time loss.

Key words: *modeling, robot, hexapod, mathematical model, center of mass, kinematics, limb damage, uncertain conditions, MATLAB.*