

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 62-523.8, 510.5

АЛГОРИТМ РУХУ АВТОНОМНОГО РОБОТА – ГЕКСАПОДА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ У ВУЗЬКИХ ЗАМКНУТИХ ПРОСТОРАХ*Платов І. М., Павловський О. М.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: a_pav@ukr.net*

У статті запропоновано застосування крокуючого робота - гексапода для його використання для контролю технічного стану вентиляційних шахт, технічних сухих каналів, замкнутих просторів тощо. Особливістю даного типу роботів є підвищена прохідність, порівняно з гусеничними або колісними машинами, завдяки конструкції та можливості долати нерівності. Також, порівняно з існуючими конструкціями, гексапод може бути повністю автономним і не залежати від стаціонарного джерела живлення. У свою чергу, побудова крокуючих роботів вимагає розробки складних алгоритмів руху, які значно відрізняються, порівняно з колісними або гусеничними рухомими пристроями, тому що, крім керування кінцівками, що приводяться до руху сервоприводами, обчислювальному ядру необхідно обробляти інформацію від датчиків. Ці датчики надають інформацію як, власне, про положення самого робота, так і про оточуючі об'єкти, тобто датчики відстані, дотичку, відеокамери, акселерометри, гіроскопи та ін.

В роботі висвітлюються розробки, що застосовуються на сьогодні, проте аналіз існуючих алгоритмів крокуючих роботів показав відсутність таких для використання робота в вузьких і замкнутих просторах, вентиляційних шахтах, сухих технічних каналах і т.п. У зв'язку з цим був розроблений алгоритм, який частково закриває цю прогалину. Особливістю даного алгоритму є простота практичної реалізації, а також безпека конструкції робота в процесі його роботи, тому що врахована необхідність підвищеної статичної стійкості, внаслідок модифікації матриці положення стану кінцівки третім станом, який надає можливість враховувати початкове положення, або запам'ятовувати стан кінцівок, із якого надалі можна продовжити рух із довільного стійкого положення. Окрім цього, алгоритм можна застосовувати не тільки для роботів із шістьма кінцівками, а і для інших видів рухомих крокуючих платформ, оскільки запропонований варіант дозволяє проводити тестування та калібрування будь-якого типу ходи на кожній ітерації кроку.

Надалі, на розробленому макетному зразку планується протестувати запропонований алгоритм не тільки при переміщенні робота по горизонтальних поверхнях, але і по вертикальних, що є важливою складовою для запропонованої сфери застосування.

Ключові слова: *крокуюча платформа; вентиляційний канал; контроль технічного стану; алгоритми керування; гексапод; статична стійкість; матриця; сервоприводи; діагностика; квадропод; адаптивне керування.*

Вступ та постановка задачі

Історія розробки крокуючих машин налічує безліч конструкцій і різних їх модифікацій [1]. Останнім часом сфера застосування таких машин значно розширилася через розвиток матеріально-технічної складової, що дозволило застосовувати їх там, де раніше це вважалося неможливим [2-3]. З усіх областей застосування, можна виділити пошукові операції, дослідницькі завдання, цивільне використання, застосування в промисловості, діагностиці та контролі стану різних конструкцій або приміщень. Існує велика кількість конструкцій, використання яких покриває практично всі, перераховані вище, області. Це і різні гусеничні роботи, мініатюрні колісні машини, багатоланкові роботи для внутрішньотрубною діагностики. Але, незважаючи на велику кількість готових рішень, є

безліч невирішених, до цього часу, проблем, пов'язаних, насамперед, зі сферою діагностики та контролю технічного стану об'єктів, зокрема, в замкнутих просторах. До таких завдань відносяться: внутрішньотрубна діагностика, перевірка та контроль стану вентиляційних шахт, різних ємностей або технічних каналів і т.п. Використовувані сьогодні, конструкції мають низку недоліків, що робить їх вузькоспеціалізованими інструментами, які не покривають весь спектр можливих завдань, що тягне за собою потребу в підборі оптимального варіанту для кожного конкретного випадку [4].

Крокуючі роботи мають переваги порівняно з колісними або гусеничними машинами, а саме: велику прохідність по нерівних поверхнях через свої конструктивні особливості, тобто наявність рухомих і опорних кінцівок, які забезпечують

підвищену стійкість, а також можливість застосування різних алгоритмів руху, що робить їх більш універсальним засобом. З найбільш використовуваних, можна виділити квадроходи, що мають чотири кінцівки та гексаподи, що мають шість кінцівок. Останні розробки провідних виробників таких роботів, спрямовані на дослідження та вдосконалення конструкцій роботів з чотирма кінцівками – квадроходів, але такі роботи мають меншу стійкість, ніж гексаподи, і вимагають складних алгоритмів керування, що ускладнює розробку і робить її більш витратною. У роботі розглядається застосування гексапода для можливості вирішення завдань контролю технічного стану в вузьких або замкнених просторах, технічних каналах, вентиляції тощо.

Варто відзначити, що колісні або гусеничні роботи також використовуються для даних цілей, проте їх алгоритми керування, значно простіші, хоча вони також можуть виявляти перешкоди та визначати шляхи їх обходу без участі оператора, для переміщення до пункту призначення. Але завдяки конструктивним особливостям, колісні або гусеничні роботи не здатні подолати суттєві перешкоди (частковий обвал каналу, крутий підйом, або спуск, вертикальний підйом тощо). У випадку з крокуючими роботами, алгоритми керування значно ускладнюються, оскільки потрібно контролювати всі ланки кінцівок для забезпечення стійкості, а також швидкості ходи, обробку інформації з датчиків її узгодження тощо, проте гексапод не має недоліків колісних або гусеничних роботів, що робить його оптимальним варіантом для дослідження важкодоступних закритих приміщень, каналів і подібних технічних об'єктів.

Існуючі розробки в області алгоритмів керування налічують багато варіантів застосування крокуючих роботів – гексаподів, але всі вони пов'язані з відкритими місцевостями, що робить їх непридатними для запропонованої сфери. Тому в цій роботі розглянуті алгоритми керування гексаподами, які можуть застосовуватися для контролю технічного стану елементів у вузьких або замкнених просторах, технічних каналах, вентиляції тощо.

Огляд літературних джерел

Потреби промисловості у забезпеченні доступу до важкодоступних місць, а також небезпечних зон та об'єктів сприяли розвитку окремого класу крокуючих роботів – роботів вертикального переміщення, котрі розглянуті в роботі [5]. Конструктивною особливістю таких роботів є використання вакуумних присосок для зчеплення з поверхнею, що може бути корисним при переміщенні по вентиляційним комплексам та каналам, проте таке рішення накладає обмеження на використання, оскільки існує потреба у вакуумній установці, що збільшує габарити і масу робота та водночас зву-

жує спектр його використання.

При огляді конструкцій сучасних роботів призначених для діагностичних цілей, що представлені в джерелах [4, 6], окрім наявності кабеля для передачі даних та живлення, недоліком є наявність шасі з колесами, яке не дає змогу роботу підійнятися вертикально або долати виступи та значні нерівності.

В існуючих прототипах крокуючих платформ, багато уваги приділяють алгоритмам ходи та керування положенням самої платформи, такі алгоритми, в основному, спрямовані на адаптивне керування. Як показано в роботі [7], алгоритми дозволяють рухатися в чотирьох напрямках, обходити перешкоди та відновлювати рух після перевертання робота. Однак, дані алгоритми представлені для руху по відкритій місцевості. Діагностика вентиляцій та каналів потребує розробки принципово нових алгоритмів, оскільки простору для маневрів немає. Також, до адаптивних алгоритмів відноситься і метод навчання з підкріпленням (Reinforcement learning або RL), який висвітлено у роботі [8], проте даний метод розглядався лише для колісних роботів.

Заслужує уваги робота розробників із Франції та США на чолі з Жан-Батістом Море [9]. Автори навчили крокуючого робота адаптуватися до пошкоджень кінцівок і після "втрати" однієї з них, приблизно за хвилину, поновлювати до 96 % своєї початкової швидкості. Застосування таких алгоритмів, безумовно, дуже ефективно, коли робот знаходиться в місцях, недоступних для його оперативного ремонту, на великих відстанях від бази, тощо, проте адаптація займає деякий час і потребує відкритих місцевостей, що унеможливає впровадження алгоритмів для запропонованої сфери застосування робота.

У роботі [10], авторами запропоновано алгоритм руху з компенсацією деформації поверхні, по якій рухається робот. Така компенсація є необхідною, якщо рух відбувається по м'яких поверхнях (грунти, піски, болотна місцевість тощо), проте в умовах приміщень, де зазвичай застосовують залізобетонні, дерев'яні або металеві конструкції, такою поправкою можна знехтувати.

Дослідники Федеральної політехнічної школи Лозани і Лозанського університету виявили, що біпедальна хода робота швидша на рівній поверхні, ніж трипедальна, яку використовують більшість комах [11]. Натомість трипедальна надає перевагу при пересуванні, наприклад вертикально. Також дослідники перевірили вплив зчеплення з поверхнею на швидкість ходи, в результаті було виявлено, що при поганому зчепленні біпедальна хода дає кращий результат. Дослідження з даної роботи будуть взяті до уваги при розробці алгоритмів руху в умовах обмеженого простору. Підхід комбінації видів руху дозволить більш ефективно долати перешкоди.

Таким чином, існуючі розробки, хоч і є перспективними, однак через свої обмеження, для сфери застосування гексапода не підходять. Тому було вирішено дослідити існуючі варіанти алгоритмів руху та адаптувати їх для руху гексапода в умовах роботи під час переміщення технічними сухими каналами, вентиляційними шахтами, трубами і т.п.

Розробка алгоритмів руху

Гексапод можна розглядати як складний динамічний об'єкт, рухомий в умовах апріорної невизначеності. Якщо робот рухається по рівній поверхні у просторі, то в такому випадку усі послідовні дії визначені попередньо і кінематика має незмінний характер, а алгоритми руху (керування) - детерміновані, але в умовах проведення контролю стану технічних сухих каналів, вентиляційних шахт, труб тощо можуть зустрічатися випадки, коли апріорна невизначеність може призвести до втрати роботом координації, падіння у провали, пошкодження частин робота, або загалом, через брак інформації про навколишнє середовище, неможливість виконання поставленої задачі.

Для ефективної експлуатації у такому випадку потрібно застосовувати адаптивні алгоритми руху, які забезпечують взаємодію із навколишнім середовищем (невідомими насамперед, умовами роботи) [12]. Для гексаподів, із самого початку їх розробки, була розроблена велика кількість таких алгоритмів для широкого спектру вирішуваних задач, однак дані алгоритми були спрямовані на керування роботом на відкритій місцевості. Дослідження вентиляційних шахт і каналів потребує додаткових коригувань, оскільки дані об'єкти представляють собою замкнуті простори і можуть мати різноманітні складові - перешкоди. Щодо іншого – принципи керування залишаються незмінними.

Для розробки алгоритму руху в умовах обмеженого простору необхідно визначити усі складові, які можуть бути визначені або експериментально, або фактично в процесі експлуатації робота. Так, зазвичай, відомими є: масо-габаритні характеристики гексапода, параметри використовуваних датчиків, а також, аналітично, характер місцевості – круглий або квадратний (прямокутний) перетин шахт, каналів і т.п. Невідомими залишаються габаритні розміри, викривлення, відгалуження досліджуваних об'єктів, їхня довжина, наявність перешкод, наприклад, на рис. 1 показана типова вентиляційна шахта, з виступами бетону, та зазорами між цеглинами.

У цьому випадку робот має відслідковувати розташування перешкод та вміти їх обходити, при цьому не втрачати швидкості пересування і рівноваги. Таким чином, можна сформулювати основний клас задач, що має вирішувати система керування, схема якої, в загальному та спрощеному вигляді

представлена на рис. 2.



Рис. 1. Вентиляційна шахта з наявними перешкодами

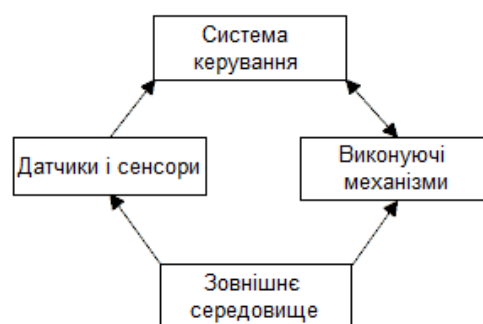


Рис. 2. Спрощена функціональна схема адаптивної системи керування

Загальний принцип функціонування відносно простий – базуючись на даних, що надходять з сенсорів, які сканують досліджувану місцевість, а також на основі інформації про положення кінцівок, відбувається обрахунок подальшого їх переміщення, та, відповідно, платформи робота.

Блок-схема алгоритму роботи представленої системи наведена на рис. 3, а. Розглянемо роботу алгоритму більш детально: на початку роботи квадропад за допомогою наявних сенсорів визначає габаритні розміри досліджуваного об'єкта. Надалі, робот, знаючи параметри кінцівок та оперуючи кутами їх відхилення, просувається вперед і водночас за допомогою далекоміра сканує об'єкт на наявність перешкод, якщо перешкоду знайдено, на базі відомих масо-габаритних характеристик відбувається обрахунок можливості подолання перешкоди. У позитивному випадку робот її долає і рухається далі, в негативному – робот посилав сигнал про неможливість обходу, наприклад, на віддалений сервер. Частина, що обведена червоним прямокутником, являє собою нескінченний цикл роботи, таким чином, циклічно продовжуються дії руху та пошуку перешкод, доки робот не досягне заданої точки траєкторії.

Також даний алгоритм можна модифікувати,

додавши до конструкції робота акселерометр, який буде працювати в режимі інклінометра, тобто відслідковувати кути нахилу платформи, а також

враховувати можливість ефективного подолання перешкоди зміною типу ходи. Оновлену блок-схему приведено на рис. 3, б.

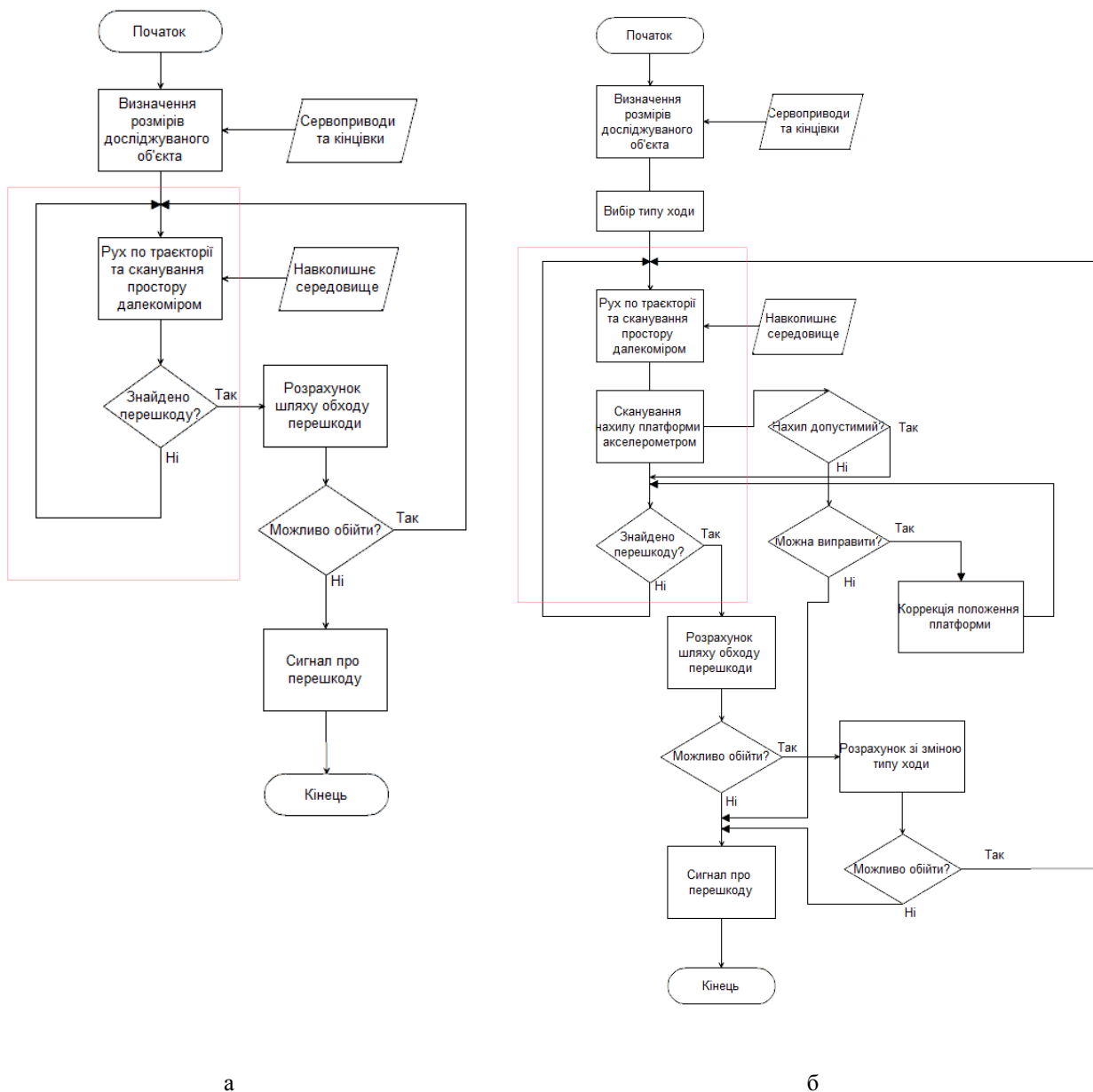


Рис. 3. Блок-схеми адаптивної системи керування

Порівнюючи дані схеми, видно, що принципи дії у них схожий, але оновлена схема потребує потужнішого обчислювального ядра, внаслідок більшої кількості оброблюваних даних. Також зростає кількість додаткових перевірок і, відповідно, зростає час прийняття рішення, проте такий алгоритм дозволяє виконувати обхід перешкод не лише в горизонтальній площині, що часто неможливо у замкнутому просторі технічних каналів, а і у вертикальному напрямку (перелізти через перешкоду).

У процесі руху по об'єкту, робот може зустріти на своєму шляху перешкоду і для її подолання може знадобитися використання іншого типу хо-

ди, відмінного від використовуваного на початку. Тому зупинимось докладніше на можливості зміни типу ходи. Якщо розглядати математичну модель положень ніг робота в процесі ходьби, то її можна представити у вигляді функції станів, як показано в роботі [13]. Автор описує стан i -ї кінцівки у момент часу t як функцією стану $q^i(t)$, що має два значення:

$$q^i(t) = \begin{cases} 1 - \text{кінцівка піднята} \\ 0 - \text{кінцівка опущена} \end{cases}$$

З метою спрощення практичної реалізації алгоритму і врахувавши аварійні ситуації, коли робот змушений перервати прямолінійний рух, про-

понується доповнити модель третім станом – станом початкового положення, а також проводити оцінку положення з точки зору сервоприводу, що керує відповідним суглобом, а не кінцівки в цілому. Із запропонованими змінами, модель положення суглобу кінцівки матиме вигляд

$$k = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

де 1 – максимальний кут повороту валу приводу;
0 – середнє (або початкове) положення валу приводу;
-1 – мінімальний кут повороту валу приводу.
У такому випадку положення валу матиме вигляд, як показано на рис. 4.

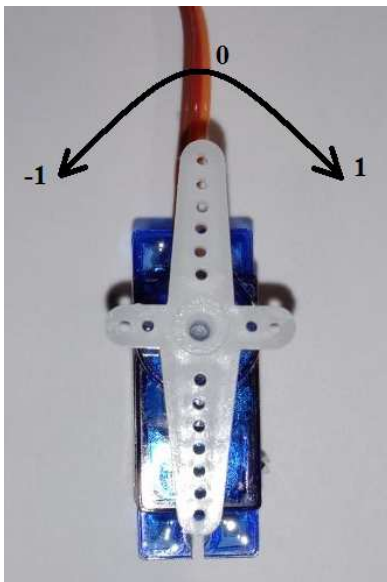


Рис. 4. Положення валу сервопривода згідно запропонованої моделі

Тобто, при встановленні стану мінімального кута (-1) вал обертається проти годинникової стрілки, а при (1) – за годинниковою стрілкою, що призведе до руху суглобу кінцівки робота у мінімальне і максимальне можливі положення відповідно. 0 – стан, за якого платформа нерухомо стоїть на поверхні, і має максимальну стійкість.

Таким чином, завдяки третьому стану, з'являється можливість враховувати початкове положення, або запам'ятовувати стан кінцівок у разі виникнення позаштатних ситуацій. І надалі – продовжити рух з останнього збереженого положення.

Оскільки алгоритм руху безпосередньо пов'язаний з форм - фактором конструкції самого робота, то в найпростішому випадку, розташування сервоприводів на платформі, як основних рушіїв, представлено на рис. 5.

Нехай у даному випадку кінцівка керується двома сервоприводами, тобто забезпечуються дві

ступені свободи на кінцівку. Для зручності реалізації програмного коду алгоритму пронумеруємо приводи як показано на рис. 5 - отримаємо пару приводів, керуючих кінцівкою (так, наприклад, пара приводів для лівої верхньої кінцівки буде 9-3).

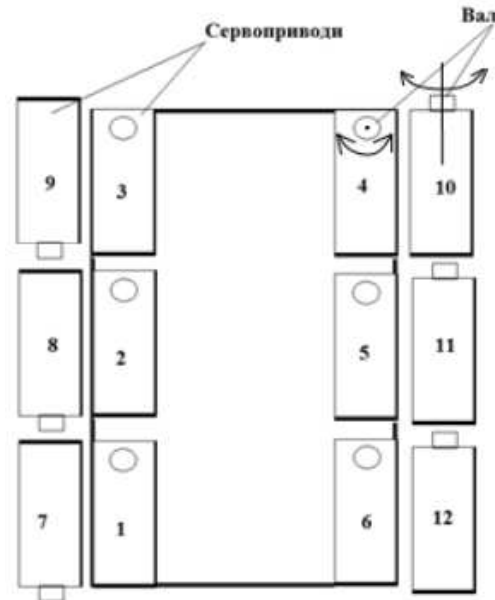


Рис. 5. Розташування сервоприводів на гексаподі

Тепер складемо матрицю керування кінцівками A_n , спираючись на запропоновану нумерацію сервоприводів на рис. 5, вона складається з станів приводів у порядку запропонованої нумерації і показана на рис. 6.

$$A_n = \begin{bmatrix} k_9 & k_3 & k_4 & k_{10} \\ k_8 & k_2 & k_5 & k_{11} \\ k_7 & k_1 & k_6 & k_{12} \end{bmatrix}$$

Рис. 6. Матриця станів приводів (матриця керування кінцівками)

Для свого переміщення гексапод може використовувати різні варіанти ходи, серед яких можна виділити трипедальну, біпедальну (використовувану комахами) і послідовну [14]. Трипедальна хода заснована на одночасному переміщенні трьох із шести кінцівок на кожному кроці, біпедальна - двох і послідовна - однієї. Остання має найбільшу статичну стійкість, тому, що при її використанні, п'ять із шести можливих точок опори зв'язані з поверхнею, перші дві відрізняються між собою швидкістю пересування. Також важливим є те, що для цих трьох варіантів ходи існує безліч їх варіацій, які розрізняються порядком і вибором переміщення конкретних кінцівок в кожен момент часу. Розглянемо формування матриць переміщення на базі трипедальної і біпедальної ходи з урахуванням модифікованої моделі k (1) положення суглобів кінцівки робота.

Матриці, в разі однієї з варіацій трипедальної ходи, матимуть вигляд (2 - 6).

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У положенні (2) усі вали приводів виставлені в середнє положення. Робот знаходиться без руху на горизонтальній поверхні

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

У положенні (3) підняті частини кінцівок, контрольовані приводами 8, 10, 12, що відповідає елементам матриці k10, k8, k12 (див. рис 6)

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

У положенні (4) усі три кінцівки знаходяться у повітрі

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

У положенні (5) кінцівки опускаються на поверхню в нових точках опори

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Потім робот переходить у стан (6), у якому піднімаються кінцівки, контрольовані приводами 7, 9, 11, і, разом з цим, «проштовхує» своє тіло вперед.

Далі цикл повторюється з іншими парами приводів аналогічно.

У випадку однієї з варіацій біпедальної ходи матриці керування мають вигляд:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$A_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Порівнюючи ці дві варіації, видно, що біпедальна хода, що описується виразами (7) – (16), потребує більше часу для переміщення і вимагає більшої кількості ітерацій, однак, як було досліджено в [11], вона швидша при переміщенні по горизонтальній поверхні.

Хода з послідовним переміщенням може використовуватися в якості пошуку точок опори при подоланні (обході) різних перешкод, і тому матриці ходи в цьому випадку складаються так само, як і для вищевказаних, і з врахуванням їх простоти, у даній роботі не наведені.

Запропонований порядок розташування кінцівок обраний з метою забезпечити роботу від можливих падінь і забезпечення більшої стійкості, тому що в даному випадку завжди першими виступає одна з передніх кінцівок робота, що дає можливість визначити провал за допомогою датчиків дотику.

Таким чином, на основі отриманих матриць, можна реалізувати програмний код алгоритму переміщення, оскільки така матриця виступає в ролі шаблону і може бути сформована автоматично. Це надає можливість експериментально формувати різні алгоритми ходи, підбираючи необхідні для конкретних місць, в яких знаходиться робот-гексапод. Також зауважимо, що введення третього стану в модель положення суглобу, дає мож-

лівість зберігати положення при позаштатних ситуаціях, сформувати буферну матрицю, яка використовуватиметься для формування матриць переміщення при подоланні перешкод, причому, матриця може бути скоригована на кожній ітерації алгоритму переміщення робота.

У подальшому, на розробленому макетному зразку планується протестувати запропонований алгоритм не тільки при переміщенні робота по горизонтальних поверхнях, але і по вертикальних, що є важливою складовою для запропонованої сфери застосування, провести адаптацію алгоритмів до типу поверхні із можливими автоматичними варіаціями швидкості, за рахунок обрання видів ходи, провести оптимізацію системи енергоспоживання, та дослідити її зв'язок із масогабаритними розмірами гексапода, дослідити мінімально необхідну кількість сенсорів для визначення перешкод і типу поверхонь із достатньою вірогідністю.

Висновки

У даній роботі запропоновано використання крокуючого робота - гексапода для задач контролю технічного стану та діагностики вузьких замкнених просторах, технічних каналах, вентиляції тощо. Проведений аналіз алгоритмів руху крокуючих роботів показав, що більшість існуючих рішень спрямовані на використання роботів на відкритих просторах і для переміщення по горизонтальних поверхнях, що не повністю задовольняють поставлені задачі.

Тому, був розроблений власний алгоритм руху, який враховує нерівності поверхні і, у подальшому, дозволить долати перешкоди у вузьких замкнених середовищах. Для цього матрицю положення стану кінцівки із [13], було доповнено третім станом, який дає можливість враховувати початкове положення, або запам'ятовувати стан кінцівок, із якого надалі можна продовжити рух із довільного стійкого положення. Далі, у роботі представлені модифіковані матриці переміщення для трипедальної і біпедальної ходи робота, автоматичний вибір яких дозволить змінювати швидкість пересування, залежно від типу поверхні.

Література

- [1]. Е. И. Юревич, *Основы робототехники: Учебное пособие, 4-е изд., перераб. и доп.*, СПб, РФ: БХВ-Петербург, 2017.

- [2]. Офіційний сайт Boston Dynamics [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.bostondynamics.com/>
- [3]. Робот-паук Неха «выгуливает» комнатные растения на солнце [Електронний ресурс]. Доступно: <https://gagadget.com/science/38806-robot-pauk-hexa-vyigulivaet-komnatnyie-rasteniya-na-solntse/#!>
- [4]. Краулеры, роботы ВТД [Електронний ресурс]. Доступно: <http://robotrends.ru/robopedia/kraulery-polzayushie-roboty>
- [5]. В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков, *Роботы вертикального перемещения*. Москва, РФ: Тип. Мин. Образования РФ, 1997.
- [6]. В. В. V. L. Deepak, M. V. A. R. Bahubalendruni, & B. B. Biswal, «Development of in-pipe robots for inspection and cleaning tasks», *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 182–210, 2016.
- [7]. S. Krenich, M. Urbanczyk, «Six-legged walking robot for inspection tasks», *Solid State Phenomena*, vol. 180, pp. 137-144, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.180.137
- [8]. С. Г. Удовенко, «Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением», *Системы обработки информации*, № 8(145), с. 56-62, 2016.
- [9]. A. Cully, J. Clune, D. Tarapore, et al. «Robots that can adapt like animals», *Nature*, vol. 521, pp. 503–507, 2015. doi: 10.1038/nature14422
- [10]. Е. В. Поезжаева, «Алгоритм управления шагающего робота при диагностике и ремонте труднодоступных участков жилых и производственных помещений», *Молодой ученый*, № 1 (105), с. 203-205, 2016.
- [11]. P. Ramdya, R. Thandiackal, R. Cherney, et al. «Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits», *Nat Commun*, vol. 8, 14494, 2017. doi:10.1038/ncomms14494
- [12]. С. И. Савин, Л. Ю. Ворочаева, «Методы управления движением шагающих внутритрубных роботов», *Cloud of Science*, Т. 5, № 1, с. 163–195, 2018.
- [13]. В. В. Лапшин, *Механика и управление движением шагающих машин*, Москва, РФ: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.
- [14]. В. В. Лапшин, «Об устойчивости движения шагающих машин», *Машиностроение и компьютерные технологии*, №6, 2014.

УДК 62-523.8, 510.5

И. М. Платов, А. М. Павловский

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

АЛГОРИТМ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА - ГЕКСАПОДА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В УЗКИХ ЗАМКНУТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

В статье предложено применение шагающего робота - гексапода для его использования для контроля технического состояния вентиляционных шахт, технических сухих каналов, замкнутых пространств и т.д. Особенностью данного типа роботов является повышенная проходимость по сравнению с гусеничными или колесными машинами, за счет своей конструкции и возможности преодолевать неровности. Также, по сравнению с суще-

ствуючими конструкціями, гексапод может быть полностью автономным и не зависеть от стационарного источника питания. В свою очередь, построение шагающих роботов требует разработки сложных алгоритмов движения, значительно отличающихся, по сравнению с колесными или гусеничными подвижными устройствами, так как помимо управления конечностями, которые приводятся в движение сервоприводами, вычислительному ядру необходимо обрабатывать информацию от датчиков, которые предоставляют информацию как, собственно, о положении самого робота, так и об окружающих объектах, в качестве которых могут быть: датчики расстояния, касания, видеокамеры, акселерометры, гироскопы и др.

В работе освещаются разработки, применяемые на сегодняшний день, однако анализ существующих алгоритмов шагающих роботов показал отсутствие таковых для использования робота в узких и замкнутых пространствах, вентиляционных шахтах, сухих технических каналах и т.п. В связи с этим, был разработан алгоритм, который частично закрывает этот пробел. Особенностью данного алгоритма является простота практической реализации, а также безопасность конструкции работа в процессе работы, так как учтена необходимость повышенной статической устойчивости за счет модификации матрицы положения состояния конечности третьим состоянием, которое дает возможность учитывать исходное положение, или запоминать состояние конечностей, из которого, в дальнейшем, можно продолжить движение с произвольного устойчивого положения. Кроме этого, алгоритм можно применять не только для роботов с шестью конечностями, но и для других видов подвижных шагающих платформ, поскольку предложенный вариант позволяет проводить тестирования и калибровки любого типа походки на каждой итерации шага.

В дальнейшем, на разработанном макетном образце планируется протестировать предложенный алгоритм не только при перемещении работа по горизонтальным поверхностям, но и по вертикальным, что является важной составляющей для предложенной сферы применения.

Ключевые слова: шагающая платформа; вентиляционный канал; контроль технического состояния; алгоритмы управления; гексапод; статическая устойчивость; матрица; сервоприводы; диагностика; квадропад; адаптивное управление.

Ilya Platov, Oleksii Pavlovskiy

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Polytechnic Institute»,

Kyiv, Ukraine

MOVEMENT ALGORITHM OF AN AUTONOMOUS ROBOT-HEXAPOD FOR MOVING IN NARROW CLOSED SPACES

The article proposes the use of a walking robot - hexapod for its use to monitor the technical condition of ventilation shafts, technical dry channels, enclosed spaces, etc. The peculiarity of this type of robots is the increased possibility in comparison with tracked or wheeled machines, due to their design and ability to overcome irregularities. Also, in comparison with existing designs, the hexapod can be fully autonomous and does not depend on a stationary power source. In its turn, construction of walking robots requires development of complex algorithms of motion, which are significantly different compared to wheeled or tracked moving devices, because in addition to the control of limbs, which are set in motion by servo drives, the computer core must process information from sensors that provide information both about the position of the robot itself, and about the surrounding objects, which can be: distance sensors, touch sensors, video cameras, accelerometers, gyroscopes, etc.

The paper highlights the developments used to date, but analysis of existing algorithms for walking robots showed a lack of such for the use of the robot in narrow and confined spaces, ventilation shafts, dry technical ducts, etc. In this regard, an algorithm was developed that partially closes this gap. The peculiarity of this algorithm is the simplicity of practical implementation, as well as the safety of the construction of work in progress, because it takes into account the need for increased static stability by modifying the matrix of limb position by a third state, which gives the opportunity to consider the initial position, or memorize the limb state, from which, in the future, you can continue the movement from an arbitrary stable position. In addition, the algorithm can be applied not only to robots with six limbs, but also to other kinds of mobile walking platforms, because the proposed variant allows testing and calibration of any type of gait at each iteration of the step.

In the future, it is planned to test the proposed algorithm on the developed prototype not only when moving the work on horizontal surfaces, but also on vertical surfaces, which is an important component for the proposed application area.

Keywords: walking platform; ventilation channel; technical condition monitoring; control algorithms; hexapod; static stability; matrix; servo drives; diagnostics; quadropod; adaptive control.

*Надійшла до редакції
11 березня 2021 року*

*Рецензовано
29 березня 2021 року*