

УДК 007.52

**ВЕРТИКАЛЬНИЙ РУХ МАЛОГАБАРИТНИХ КРОКУЮЧИХ РОБОТІВ.
ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ***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 наведено огляд стану проблеми розробки малогабаритних крокуючих роботів вертикального переміщення завдяки силам тертя між кінцівками та поверхнею. Зокрема, особливу увагу приділено малогабаритним крокуючим роботам - гексаподам, оскільки вони мають високу стійкість та прохідність, порівняно з іншими типами роботів, як колісними, так і гусеничними. На відміну від інших типів роботів, гексаподи можуть бути повністю автономними. Це робить їх потенційно універсальним засобом для вирішення різноманітних задач у різних сферах, наприклад: рятувальні операції - гексаподи можуть проникати у зруйновані будівлі для оцінки стану під завалами, досліджувати підводні простори, загалом, рухатися в місцях, де недостатньо місця для руху та складних маневрів; військове застосування - гексаподи можуть розмінувати/мінувати території, використовуватися для розвідки або зйомки території, водночас зберігаючи життя людей через можливість повної автономності; промислове застосування - завдяки своїй маневреності та прохідності, роботи гексаподи можуть стати незамінними при роботах на кар'єрах та будівництвах, де присутні схили, гірські місцевості, та загалом там, де колісні або гусеничні роботи не можуть легко пересуватись; спелеологія - пошук та розвідка корисних копалин всередині печер, шахт тощо; ліквідація аварій, зокрема, в атомній енергетиці.

Незважаючи на довгу історію розвитку та значний прогрес у цій галузі, завдяки якому вже відомо безліч конструктивних рішень та модернізацій, на даний момент проблема вертикального руху малогабаритних роботів-гексаподів завдяки силам тертя досі залишається невирішеною.

Існуючі розробки спрямовані, зазвичай, на рух по поверхням завдяки імітації кінцівок біологічних істот (комах, тварин тощо), що дозволяє роботам підніматися вгору завдяки клейкій речовині, зчіплятися з поверхнею механічними кігтями і т. п. Також давно відомі конструкції з магнітами та присосками, однак таке рішення потребує дуже потужного джерела живлення і не є універсальним.

Тож, одним із перспективних напрямів досліджень є вертикальний рух роботів-гексаподів завдяки силам тертя між кінцівками та поверхнею, оскільки водночас робот зберігає автономність та не потребує спеціального обладнання та додаткового зв'язку з джерелом живлення (компресором тощо), і, що більш важливо, здатен здійснювати рух як по горизонтальним поверхням, так і по вертикальним.

На даний момент є декілька прикладів успішного застосування гексаподів для вертикального руху, проте огляд робіт продемонстрував, що проблема вертикального руху малогабаритних роботів-гексаподів залишається актуальною та потребує подальших досліджень і розробок. Існуючі досягнення в цій галузі дозволяють сподіватися на те, що в майбутньому ми продемонструємо ефективні рішення цієї проблеми та широке поширення гексаподів у різних галузях промисловості та науки.

Ключові слова: крокуючий гексапод; платформа; сервоприводи; математична модель; вертикальний рух; сили тертя; області застосування; малогабаритний; поверхні; автономність; кінцівка.

Вступ. Постановка задачі

Четверта промислова революція встановила кількісний та якісний перехід від, керованих операторами, механічних засобів до повністю автоматизованих інтелектуальних систем [1]. З ще більшою інтенсивністю відбувається масштабна автоматизація небезпечних виробництв, енергетики, господарств тощо. Здебільшого, це стало можливим завдяки впровадженню та покращенню роботів та роботизованих систем різного призначення, функціоналу та конфігурації.

Сучасні роботи – високотехнологічні пристрої, що здатні майже повністю обійтись без кон-

тролю людини. Вони можуть забезпечити високу точність виконуваних операцій, при цьому швидкість на порядки перевищує людську. До того ж, роботи здатні працювати в небезпечних для людини умовах.

У минулому столітті обчислювальних потужностей ще не вистачало для побудови повністю автономних робототехнічних засобів, тому вони керувались оператором, наприклад, тільки для ліквідації аварії на Чорнобильській атомній електростанції були задіяні декілька різноманітних конструкцій на колісному та гусеничному шасі [2]. Деякі з них керувались оператором дистанційно,

але зв'язок та живлення були реалізовані провідним шляхом, що обмежувало потенційну відстань пересування. До цього слід також додати, що на той час не було мініатюрних та потужних акумуляторів для живлення таких конструкцій, наразі існує багато варіацій різноманітних акумуляторів та батарей, як високострумівих для живлення потужних елементів та двигунів, так і малострумівих, для живлення датчиків, сенсорів, мікроконтролерів тощо [3].

Наразі технічний стан дозволяє проєктувати повністю автономні та гнучкі у налаштуванні конструкції, завдяки чому є можливість не наражати людські ресурси на небезпеку, навіть у випадку техногенних катастроф, до яких також відносяться та роботизація. На даний час активно впроваджуються роботи-пожежники [4, 5]. Вони мають гусеничне шасі, керуються дистанційно та можуть перевозити вантаж. Однак, варто зауважити, що такі конструкції призначені лише для відкритих місцевостей, і не дозволяють потрапляти всередину будівель і, тим паче, підійматися по сходах, а також оминати важкопрохідні засмічені ділянки.

Тому перспективним напрямком стають крокуючі роботи, які мають більшу прохідність та можуть працювати повністю автономно, перевозити корисні вантажі тощо [6 - 7]. Крокуючі роботи мають перевагу в багатьох сферах діяльності, де важливо мати рухливість – на нерівному, гірському або крутому рельєфі, зокрема використовуються у:

- рятувальних операціях: Роботи-гексаподи можуть легко пройти через обвалені або зруйновані будівлі, місця, де недостатньо місця для руху людині або колісному пристрою, у тому числі й під водою, для проведення ремонтних робіт або дослідження підводних систем [8].
 - сільському господарстві: Роботи-гексаподи можуть бути використані для збирання плодів і овочів на гірських схилах або важкодоступних місцях, а також для збирання плодів і овочів з високих дерев.
 - військовому застосуванні: Роботи-гексаподи можуть бути задіяні в задачах розминування місцевості. Можуть використовуватися у розвідувальних операціях для збирання інформації про територію під час розвідки, проникаючи в місця, недоступні для людей у тому числі в середині будівель використовуючи технічні канали або люки. Для виявлення та знешкодження вибухових пристроїв, або доставки та підтримки обладнання або спорядження. Легко може бути замаскований під елемент навколишнього оточення.
- Вже відомі випадки застосування крокуючих роботів сумісно з людьми для виконання операцій у міській місцевості [9]. Військовий навчальний заклад École Spéciale Militaire de

Saint-Cyr використав для навчання квадропод з метою перевірки ефективності роботизації військової сфери. В результаті, при використанні роботів, втрати особового складу при різних сценаріях були відсутні (рис. 1).



Рис. 1. Використання крокуючого робота на військових навчаннях [9]

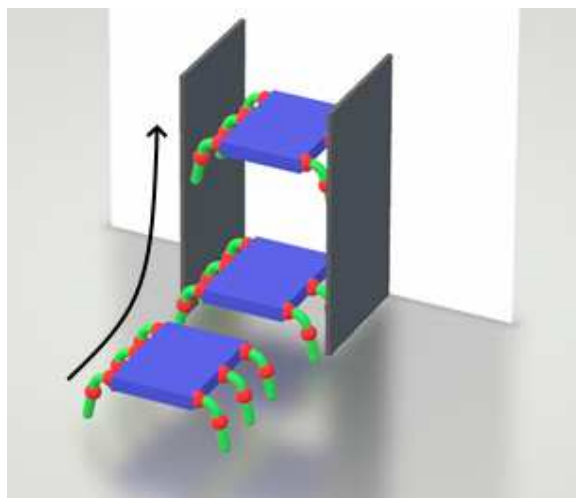
Однак, квадроподи через меншу кількість кінцівок, потребують складних алгоритмів для балансування і не можуть рухатися вертикально завдяки силам тертя кінцівок і поверхні, тому їхня потенційна сфера застосування значно менша, ніж у гексаподів.

- індустрії: Роботи-гексаподи можуть бути використані для руху по складних поверхнях, таких як будівельні майданчики та рудні кар'єри, де колісні або гусеничні роботи не можуть легко пересуватися.
 1. Обслуговування інфраструктури. Інспекція та автоматизоване обслуговування складних систем, наприклад, трубопроводів, газових та нафтопроводів, залізничних колій та електричних ліній.
 2. Догляд за будинками. Підтримання чистоти та порядку у внутрішніх приміщеннях, за допомогою своїх маніпуляторів та/або захватів вони можуть переміщувати предмети на, попередньо визначені, місця.
 3. Збір інформації. Збір даних у небезпечних або недоступних місцях, наприклад, у зоні аварії на ядерній електростанції або в лісовому масиві, де є ризик зіткнення з дикими тваринами.
 4. Інвентаризація. Це може бути керування складами, переміщуючи товари за допомогою своїх маніпуляторів та/або захватів.
 5. Виробництво. Можуть бути використані для допомоги на виробництві, наприклад, переміщення вантажу, або контроль стану приміщень.
 6. Монтаж обладнання. Монтаж у важкодоступних місцях, у вузьких каналах тощо.
- спелеології: Робот-гексапод може бути використаний для дослідження підземних систем, огляду недоступних ділянок печер або для збору даних про геометрію та гідравлічні ха-

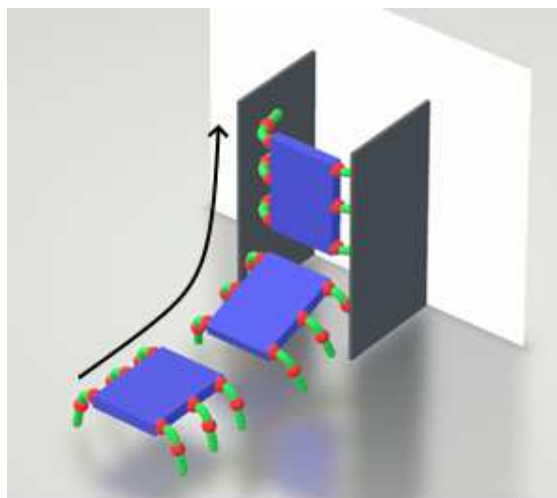
рактики печерних просторів. Також роботи-гексаподи можуть використовуватись для пошуку виходу з печерних систем у разі аварійної ситуації. Вони можуть перетинати вузькі проходи й круті схили, що дозволяє їм досліджувати печери більш ефективно, ніж людина. Деякі роботи гексаподи також оснащені датчиками, які можуть виявляти зміни у складі повітря або рівня небезпечних газів, що дозволяє уникнути можливих небезпек при роботі в печерах.

У цих сферах діяльності роботи-гексаподи мають перевагу перед іншими типами роботів завдяки своїй здатності до руху на нерівному рельєфі та легкості пересування в обмеженому просторі. Тому їх розробка, впровадження та використання є сучасною та актуальною проблемою.

Вертикальний рух малогабаритних роботів-гексаподів – на сьогодні є однією з ключових проблем, яку ставлять перед собою інженери та розробники у галузі робототехніки. Існує цілий клас роботів – роботи вертикального переміщення [10].



а



б

Рис. 2. Варіанти положення платформи гексапода при підйомі вгору за рахунок сил тертя кінцівок і поверхні: а) паралельно підлозі, б) перпендикулярно підлозі

Огляд відомих технічних рішень

За довгу історію розвитку крокуючих роботів було розроблено дуже багато різноманітних конструкцій та запропоновано безліч рішень для вирішення широкого спектру задач як для виробництва, так і спеціальних застосувань. Але технічний стан до недавнього часу не дозволяв реалізувати вертикальний рух робота-гексапода саме внаслідок сил тертя кінцівок і поверхні. Для вирішення задач, які потребують роботу на висоті, були сконструйовані різноманітні конструкції як колісних, так і крокуючих роботів, досить вичерпний огляд яких зроблено в роботі [12], де показані сучасні досягнення в області побудови та розробки роботів вертикального переміщення. Зроблено огляд конструкцій, які зчіплюються з поверхнею механі-

Більшість робіт в даному напрямку спрямована на вдосконалення та розробку нових засобів для зчеплення з поверхнею або алгоритмів керування [11].

Однак вертикальне переміщення можливе також через силу тертя, яка виникає внаслідок контакту кінцівок з поверхнею. Завдяки чому, робот може підійматись по різноманітним каналам і шахтам без додаткових засобів, тобто переходити із горизонтальних площин у вертикальні, що робить його гнучким та універсальним, подібно до павуків (рис. 2).

Отже, оскільки гексаподи характеризуються високою маневреністю та стійкістю, то це робить їх привабливим варіантом для вирішення задачі вертикального руху.

Однак на даний момент ця проблема досі залишається недостатньо дослідженою. Тому метою цієї роботи є огляд стану проблеми вертикального руху крокуючих роботів-гексаподів завдяки силам тертя кінцівок і поверхні та визначення напрямків подальшого розвитку.

ними застосуваннями, такими як: спеціальні зацепи, що дозволяють роботам підійматися по деревам або стінам, вакуумні присоски, кабелі, колеса для підйому по трубах, засоби, які реалізують підйом за рахунок електростатичних сил, магнітного поля, окрім цього, розглянуті конструкції з пневматичними "клевнями", а також аеродинамічні засоби – пропелери. Однак, незважаючи на досить широкий спектр розглянутих робіт та конструкцій, в роботі недостатню увагу приділено конструкціям, що рухаються вгору завдяки силам сухого тертя.

На даний момент є кілька прикладів успішної розробки гексаподів для вертикального руху, наприклад, дана проблема висвітлена у роботі [13], де автори змоделювали статично невизначені сили

на базі матриць жорсткості. Завдяки врахуванню цих сил, деформація робота може бути оцінена і відповідно врахована для надійного підйому вгору. Дослідники підійшли до вирішення проблеми представленням кожної кінцівки гексапода в якості маніпулятора та застосували для обрахунку метод віртуального суглоба (англ. Virtual Joint Method), щоб змоделувати жорсткість кожної кінцівки [14]. Окрім цього, був введений коефіцієнт надійності, який враховує два режими відмови: недостатнє тертя та великий обертовий момент двигуна кінцівки. Для відстеження положення платформи та компенсації похибок, які виникають під час ходи, був застосований IMU та PID регулятор – це значно підвищило надійність вертикальної ходи між стінами.

Перевірка ефективності запропонованої методики відбувалася за сценаріями:

- вертикальна хода між двома стінами з різною відстанню до них, в результаті робот зміг залізти вгору. При цьому кінцівки робота були оголені наждачним папером, який в сумі з матеріалом стін дав коефіцієнт тертя близько 0.7.
- вертикальне переміщення різними типами ходи. В результаті отриманий цілком очікуваний результат, коли трипедальна хода показала гірший результат, ніж хвильова, за якої усі 5 кінцівок контактують з поверхнею, а 1 знаходиться у стані переносу. Також була суттєва різниця для цих типів ходи з урахуванням коефіцієнта надійності, що був значно вищим у хвильової ходи.

В роботі [15] дослідники розробили систему планування руху крокуючого робота - гексапода для його вертикального переміщення між двома вертикальними стінами за допомогою кінцевих ефекторів, які використовують тільки сили тертя. Оскільки вертикальний рух для такого класу роботів за таких умов набагато складніший, ніж горизонтальний, то вчені розділили задачу на дві частини: визначення положення платформи та визначення контактних сил, що діють на кінцівки. При цьому потрібно враховувати багато факторів, наприклад, деформацію платформи та кінцівок внаслідок притискання їх до поверхні для забезпечення достатньої сили тертя, щоб утримувати гексапод. Для цього автори врахували гнучкість кінцівок в матриці жорсткості всієї конструкції. Для підвищення надійності автори також ввели коефіцієнт безпеки, який враховує два режими відмови: недостатнє тертя та великий обертовий момент двигуна кінцівки.

Планування руху платформи було реалізовано із застосуванням нелінійного програмування та змішаного алгоритму цілочисельного програмування з подальшим вирішенням стандартних задач випуклої оптимізації.

Апробація запропонованих методів відбувалася експериментальними дослідженнями з насту-

пними сценаріями: підйом між двома стінками по сходах, підйом між двома стінками з оминанням перешкод та підйом по непаралельних стінах. При цьому стіни були покриті гумою, а кінцівки робота спеціальною стрічкою, завдяки чому коефіцієнт тертя приблизно дорівнює 1. Швидкість підйому в усіх трьох сценаріях була приблизно 20 см/хв. В результаті робот впорався з підйомом в усіх трьох сценаріях.

Отже, незважаючи на наявні досягнення, проблема вертикального руху крокуючих роботів завдяки силам тертя є неповністю вирішеною, оскільки в наявних роботах в якості зразків поверхні застосовувалися матеріали, які були підібрані таким чином, щоб отримати якомога більший коефіцієнт тертя кінцівки з поверхнею, що у реальних умовах, звісно, не є можливим. Наприклад, якщо розглядати гексапод в якості засобу для спелеологічних досліджень, то слід враховувати не лише викривлення стін, які можуть бути досить значними, а й фактор вологи та потоку води. В індустріальному застосуванні найпоширенішими матеріалами є бетон, цегла, дерево тощо, тому матеріал кінцівок повинен бути підібраний таким чином, щоб незалежно від умов та типу поверхні забезпечувати надійний контакт і коефіцієнт тертя відповідно.

Окрім цього, важливим недоліком даних робіт є відсутність системи зору, що є необхідною складовою для оцінки навколишнього середовища. Також застосування та апробація ходи на шаблонах, хоча і може вирішувати деякі задачі, але спектр таких задач буде занадто вузьким, щоб застосовувати крокуючі роботи в реальних умовах. Тому наявні роботи, хоча і є перспективними та досить повними, але лише за лабораторних умов.

Загалом, можна відзначити, що проблема вертикального руху малогабаритних роботів-гексаподів залишається актуальною та потребує подальших досліджень та розробок.

Напрямки подальшого розвитку

На відміну від горизонтальних поверхонь, де для гарного контакту достатньо покрити кінцівку гумою, вертикальне переміщення потребує принципово інших засобів для підвищення коефіцієнту тертя. Можливим розвитком у цьому напрямі можуть бути: застосування різноманітних сучасних матеріалів, які можна нанести на кінцівки для кращого контакту з поверхнею [16]. А також врахувати автономний спосіб очищення їх від бруду. Також багато досліджень є в напрямку реалізації форми кінцівок у вигляді мікроструктур, подібно до біологічних істот [17]. Наприклад, кінцівка гекона може зчіплюватися з будь-якою поверхнею за рахунок наявних щетинок, контакт яких створює багато точок слабких міжмолекулярних взаємодій – сили Ван-дер-Ваальса [18]. Тому, беручи до уваги біологію кінцівок живих істот, можна

наближено реалізовувати їх у вигляді технічних рішень із застосуванням сучасних матеріалів.

Таким чином можна вдосконалити конструкції кінцівок та уніфікувати їх для ходи робота по різних вертикальних поверхнях, в тому числі й вологих.

Для кращого оминання роботом перешкод можлива побудова принципово інших конструкцій, відмінних від найбільш розповсюджених (рис. 3).

Прикладом конструктиву може бути робот-гексапод Z6, розроблений RobuGtiX [19]. Дана конструкція також представляє собою платформу, але кінцівки розміщені не за периметром, а з обох боків платформи (рис. 4).



Рис. 3. Типова конструкція робота-гексапода являє собою платформу з розміщеними навколо неї кінцівками



а



б

Рис. 4. Варіант конструкції: а) в розгорнутому стані, б) у згорнутому стані.

Проаналізувавши приклад підйому, що наведений на рис. 2, а, бачимо, що підйом робота здійснюється таким чином, що платформа паралельна поверхні підлоги. Завдяки цьому центр мас знаходиться під кінцівками, і навантаження рівномірно розповсюджується по усіх кінцівках, що знаходяться в контакт з поверхнею. Але можливий і інший варіант підйому, коли платформа перпендикулярна підлозі (рис. 2, б). Водночас, центр мас робота зміщений в бік, протилежний кінцівкам. Через це збільшується навантаження на них, і робот може втратити рівновагу або впасти.

Порівнюючи конструкції на рис. 3 та рис. 4, можна дійти висновку, що конструкція з кінцівками, що розташовані з обох боків платформи в даному випадку буде більш стійкою, центр мас такої конструкції знаходиться між кінцівками, тому стає можливим не лише рух, який показано на рис. 2, а, а й рух з рис. 2, б. Таким чином, конструктивна складова є дуже важливим фактором, який дозволить реалізувати не лише підйом, а й оминання перешкод завдяки зміні положення платформи без втрати рівноваги. Можливі й інші варіанти конструкцій, що дозволять більш ефективно реалізувати вертикальний рух за рахунок сил тертя, наприклад побудова кінцівок на базі пневмоциліндрів,

завдяки чому вони можуть змінювати свою довжину і здійснювати контакт зі стінами, навіть якщо вони занадто широкі.

Іншим важливим фактором є енергоефективність. В наявних розробках відсутні дослідження енергоефективності при вертикальному русі. Для забезпечення достатнього контакту з поверхнею, одних лише матеріалів кінцівок недостатньо, потрібно додатково враховувати підвищене навантаження на двигуни (сервоприводи), яке виникає внаслідок їх довороту таким чином, щоб створювати достатню силу притискання. Це в свою чергу підвищує енергоспоживання кожного привода, яких на одному роботі може бути 12 - 18. Тому існуючі розробки потребують також досліджень в цьому напрямі.

Також доцільно буде врахувати не лише фактор збереження енергії при русі, а й можливість перемикання ходи при русі для більш ефективного долавання перешкод при необхідності [20]. Але в такому випадку може виникнути конфлікт знайденого рішення підсистемою енергозбереження та підсистемою перемикання ходи. Для цього в систему вводиться додатковий обчислювач, який знаходить компромісне рішення, яке буде враховувати не лише енергоефективність, а й водночас

перемикач тип ходи.

Тому математична модель усієї системи має враховувати обидва рішення та визначати компромісне. Функціональна схема такої системи приведена на (рис. 5).

Дана схема відображає концепцію розділення усієї системи на окремі підсистеми, завдяки чому можна не тільки перемикач різні режими роботи, а й реалізувати компромісні рішення.

За допомогою далекоміра визначаються відстані та габарити перешкод або карта навколишнього середовища (ландшафту), а ІМУ визначає кути орієнтації платформи гексапода [21]. Дана інформація оброблюється підсистемами енергозбереження та перемикач типу ходи, потім обчислювач знаходить компромісне рішення і, відповідно, керує сервоприводами. Також можливі інші варіації, але вони будуть залежати від поставлених задач, які має вирішувати робот.

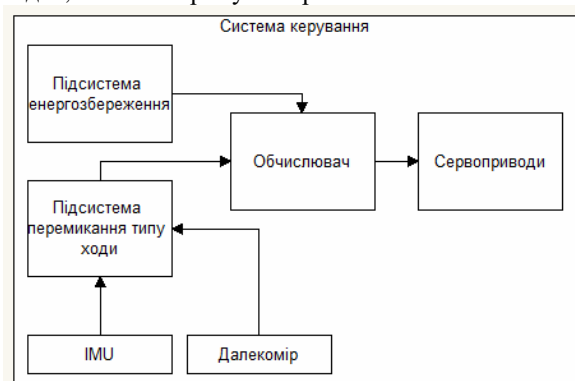


Рис. 5. Функціональна схема системи керування з розділеними підсистемами енергозбереження та перемикач типу ходи

Окрім цього, для реального застосування гексапода необхідна система зору, щоб він міг орієнтуватися в просторі та визначати розміщення та габарити перешкод, а також профіль поверхні, по якій планується рух. Найбільш розповсюдженим рішенням є використання камер, та/або далекомірів [22, 23]. В роботах [23, 24], де досліджуються далекоміри в якості системи зору мобільних роботів, не представлені результати щодо вирішення проблеми зменшення похибки вимірювання відстані, залежно від матеріалів середовища. Приведені математичні моделі далекомірів не враховують залежність похибки вимірювання відстані від типу матеріалу, на який потрапляє промінь далекоміра.

Для цього необхідно розробити математичну модель, яка б враховувала залежність похибки вимірювання відстані від типу матеріалу, на який потрапляє промінь далекоміра.

Таким чином, існує багато напрямів досліджень, кожен з яких має суттєве значення для побудови автономного крокуючого робота-гексапода, який пересуватиметься вертикально завдяки силам тертя. Тому це є перспективним

новим напрямом, який потребує і конструктивних, і програмно-алгоритмічних доопрацювань та покращень. Існуючі досягнення в цій галузі дозволяють сподіватися на те, що в майбутньому ми побачимо ефективні рішення цієї проблеми та широке поширення гексаподів у різних галузях промисловості та науки.

Висновки

В даній роботі огляд стану проблеми вертикального переміщення малогабаритних крокуючих роботів-гексаподів завдяки силам тертя кінцівки та поверхні, по якій рухається робот, показав, що на даний час проблема досліджена лише частково. Наявні розробки, хоча і привносять досить значний вклад, але є обмеженими та можуть бути застосовані лише за лабораторних умов для подальших досліджень.

Тому, ґрунтуючись на розглянутих роботах, були визначені подальші перспективи розвитку:

- 1) використання нових матеріалів для реалізації зчеплення кінцівок з різними поверхнями подібно тваринам;
- 2) розробка конструкції, кінематика якої дозволить рухатися не тільки горизонтально, а й вертикально, зокрема внаслідок сил тертя кінцівки та поверхні.
- 3) розробка системи позиціонування, яка б враховувала різноманітні ситуації й відповідно приймала рішення стосовно енергоефективності руху та/або перемикач типу ходи для кращої прохідності;
- 4) модифікація системи зору внаслідок врахування в математичній моделі компенсацію похибок вимірювання відстані від типу матеріалу, що є особливістю лазерних далекомірів. Також можливе комплексування іншими типами далекомірів, або камерами.

Загалом, для реального використання, зокрема, реалізації вертикального руху завдяки силам тертя, можуть бути покращені конструктивні та програмно-алгоритмічні рішення, тобто майже усі складові робота. Завдяки цьому, у майбутньому, можна буде побачити ефективні рішення цієї проблеми та реальне застосування крокуючих гексаподів не лише у вигляді прототипів, а й в реальних умовах у різних галузях промисловості та науки.

Література

- [1] The Fourth Industrial Revolution. [Online]. Available: https://law.unimelb.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf
- [2] А. С. Садовніков, "Використання робототехніки при ліквідації наслідків аварій на АЕС", у *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля: наук.-техн. зб.*, 2014, Вип. 22, с. 23–33.
- [3] О. М. Павловський, І. М. Платов, "Система

- живлення крокуючого гексапода”, на *The X International Science Conf. Topical issues, achievements and innovations of fundamental and applied sciences*, March 09 – 12, 2021, Lisbon, Portugal.
- [4] Тактичний робот для гасіння пожеж: де його зможуть використовувати рятувальники Полтавщини. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://suspilne.media/423621-takticnij-robot-dla-gasinna-pozez-de-jogo-zmozut-vikoristovuvati-ratuvalniki-poltavsini/>
- [5] Thermite RS3. [Online]. Available: <https://www.textronics.com/products/thermite>
- [6] І. М. Платов, О. М. Павловський, “Гексапод для діагностики складних споруд та інженерних об’єктів. Система живлення”, на *XVI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вч. Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні*, Київ, 2020, с. 37-41.
- [7] I. Platov, O. Pavlovskiy, Y. Pavlovskaya, “Features of using the laser sensor as a vision system for mobile robots”, in *Proceedings of II International Scientific and Practical Conf. Modern directions of scientific research development*, Chicago, USA, 2021 pp. 80-85.
- [8] W.-S. Ji and B.-K. Cho, “Development of a walking algorithm on the uneven terrain for a hexapod robot Little Crabster200”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 7, pp. 1-12, Jul. 2018. DOI: 10.1177/1687814018784818.
- [9] The French army is testing Boston Dynamic's robot dog Spot in combat scenarios. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2021/4/7/22371590/boston-dynamics-spot-robot-military-exercises-french-army>
- [10] В. К. Персиков, М.М. Поліщук, “Аналіз проблем створення технологічних роботів вертикального переміщення,” *Адаптивні системи автоматичного управління*, № 1(24), с. 87–95, 2014. DOI: 10.20535/1560-8956.24.2014.38195.
- [11] М. М. Поліщук, “Підвищення енергоефективності роботів вертикального переміщення,” *Адаптивні системи автоматичного управління*, т. 2, №. 33, с. 97–105, 2018. DOI: 10.20535/1560-8956.33.2018.164679.
- [12] G. Fang and J. Cheng, “Advances in Climbing Robots for Vertical Structures in the Past Decade: A Review,” *Biomimetics*, vol. 8, no. 1, p. 47, Jan. 2023. DOI: 10.3390/biomimetics8010047.
- [13] X. Lin, H. Krishnan, Y. Su, and D. W. Hong, “Multi-Limbed Robot Vertical Two Wall Climbing Based on Static Indeterminacy Modeling and Feasibility Region Analysis”, *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct. 2018. DOI: 10.1109/iros.2018.8593734.
- [14] A. Klimchik, S. Caro, B. Furet, and A. Pashkevich, “Complete Stiffness Model for a Serial Robot”, in *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2014. DOI: 10.5220/0005098701920202.
- [15] X. Lin et al. "Optimization Based Motion Planning for Multi-Limbed Vertical Climbing Robots", arXiv:1909.06339, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1909.06339
- [16] M. P. Murphy, C. Kute, Y. Mengüç, and M. Sitti, “Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 1, pp. 118–133, Oct. 2010. DOI: 10.1177/0278364910382862.
- [17] P. Borijindakul, A. Ji, Z. Dai, S. N. Gorb, and P. Manoonpong, “Mini Review: Comparison of Bio-Inspired Adhesive Feet of Climbing Robots on Smooth Vertical Surfaces”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 9, Sep. 2021. Doi: 10.3389/fbioe.2021.765718.
- [18] J. N. Israelachvili, *Intermolecular and surface forces*. London: Academic Press, 2010.
- [19] Robugtix Ltd. [Online]. Available: <https://www.robugtix.com/z6-robot>
- [20] M. Luneckas et al., “Hexapod Robot Gait Switching for Energy Consumption and Cost of Transport Management Using Heuristic Algorithms”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1339, Feb. 2021. DOI: 10.3390/app11031339
- [21] S.-H. P. Won, F. Golnaraghi, and W. W. Melek, “A Fastening Tool Tracking System Using an IMU and a Position Sensor With Kalman Filters and a Fuzzy Expert System”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1782–1792, May 2009. DOI: 10.1109/tie.2008.2010166.
- [22] S. L. X. Francis, S. G. Anavatti, M. Garratt, and H. Shim, “A ToF-Camera as a 3D Vision Sensor for Autonomous Mobile Robotics”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 12, no. 11, p. 156, Jan. 2015. DOI: 10.5772/61348
- [23] C. Nahler, C. Steger, and N. Druml, “Quantitative and Qualitative Evaluation Methods of Automotive Time of Flight Based Sensors”, *2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, Aug. 2020. DOI: 10.1109/dsd51259.2020.00106.
- [24] J. Azeta, C. Bolu, D. Hinvi, and A. A. Abioye, “Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 707, p. 012012, Dec. 2019. DOI: 10.1088/1757-899x/707/1/012012.

UDC 007.52

Ілля Платов, Олексій Павловський

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

VERTICAL MOTION OF MINIATURE WALKING ROBOTS. STATE OF THE PROBLEM REVIEW

The article reviews the state of the art of developing miniature walking robots for vertical movement due to friction forces between limbs and surface. In particular, special attention is paid to miniature walking robots - hexapods, as they have good stability and cross-country ability compared to other types of robots, both wheeled and tracked. Unlike other types of robots, hexapods can be fully autonomous. This makes them a potentially versatile tool for solving a variety of tasks in different areas, such as: 1) rescue operations - hexapods can penetrate destroyed buildings to assess the condition under the rubble, explore underwater spaces, and generally move in places where there is not enough space for movement and complex maneuvers; 2) military use - hexapods can clear mines, be used for reconnaissance or surveying, while saving lives due to the possibility of complete autonomy; 3) industrial applications - due to their maneuverability and cross-country ability, hexapod robots can become indispensable in quarries and construction sites where there are slopes, mountainous terrain, and generally where wheeled or tracked robots cannot easily move; 4) speleology - search and exploration of minerals inside caves, mines, etc; 5) accident response, in particular, in the nuclear power industry.

Despite the long history of development and significant progress in this area, thanks to which many design solutions and modernizations are already known, the problem of vertical movement of small hexapod robots due to friction forces still remains unsolved.

Existing developments are usually aimed at moving on surfaces by imitating the limbs of biological creatures (insects, animals, etc.), which allows robots to climb upwards thanks to an adhesive substance, grip the surface with mechanical claws, etc. Magnet and suction cup designs have also been known for a long time, but this solution requires a very powerful power source and is not universal.

Therefore, one of the most promising areas of research is the vertical movement of hexapod robots due to friction forces between the limbs and the surface, since the robot remains autonomous and does not require special equipment and additional communication with a power source (compressor, etc.), and, more importantly, is able to move both on horizontal and vertical surfaces.

At the moment, there are several examples of successful use of hexapods for vertical movement, but the review of works has shown that the problem of vertical movement of miniature hexapod robots remains relevant and requires further research and development. Existing achievements in this area give us hope that in the future we will demonstrate effective solutions to this problem and the widespread use of hexapods in various industries and science.

Keywords: walking hexapod; platform; servos; mathematical model; vertical movement; friction forces; applications; miniature; surfaces; autonomy; limb.

*Надійшла до редакції
02 травня 2023 року*

*Рецензовано
20 травня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).