

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 623.437-526:007.52]:623.365

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/24>

Янко А.С.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Лактіонов О.І.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Михайліченко О.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Крук О.О.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ НА РОБОТОТЕХНІЧНІЙ ПЛАТФОРМІ

Стаття присвячена формуванню теоретичних основ щодо інструментарію для розмінування на робототехнічній платформі. Основними цілями розмінування є ефективне, економічне, надійне, швидке та максимально безпечне виявлення та очищення від боєприпасів та мін забруднених вибухонебезпечними предметами території. Проблема, що пов'язана з розмінуванням характеризується величезною різноманітністю характеру вибухонебезпечних боєприпасів, складністю погодних умов, а також типом рельєфу.

У статті проведено аналіз інструментів розмінування та приклади їх застосування на роботизованих платформах. Аналізується важливість автоматизації і використання таких систем у процесах знешкодження вибухонебезпечних предметів, які становлять серйозну загрозу для життя людей на територіях, що постраждали від військових конфліктів. Основна увага приділяється аналізу різних сенсорних систем, а саме металошукачів, георадарів і хімічних аналізаторів, для підвищення точності виявлення мін, а також допоміжних технологічних механізмів. Максимальне задіяння мультисенсорних систем в процесі розмінування, а саме етапі виявлення вибухонебезпечних об'єктів, є дієвим інструментом.

Проведено комплексний аналіз актуальності потреби удосконалення існуючих та розробки нових мобільних робототехнічних платформ для реалізації процесу розмінування місцевості. Розглянуто популярні рішення з залученням робототехнічних комплексів, які використовуються для знешкодження боєприпасів та мін.

Здійснено порівняльний аналіз основних переваг даних робототехнічних платформ відповідно до умов використання.

Розкрито важливість автономності та мобільності таких платформ для ефективного розмінування на рельєфній місцевості чи за складних погодних умов.

Результати дослідження підкреслюють важливість подальшого розвитку гібридних технологій і стандартів для спрощення процесу розмінування та підвищення його ефективності та зниження собівартості.

Ключові слова: автономність платформи, вибухонебезпечний предмет, георадар, металошукач, механізм переміщення, міношукач, мультисенсорна система, робототехнічна платформа.

Постановка проблеми. Знешкодження вибухонебезпечних предметів є однією з найважливіших і найскладніших гуманітарних і технічних проблем сучасності. Мінні поля, що утворилися

внаслідок збройних конфліктів і актів тероризму, зробили величезні території по всьому світу небезпечними для проживання людей, сільськогосподарської діяльності та реконструкції інфраструк-

тури. Міни, боєприпаси, що не вибухнули, та інші вибухонебезпечні предмети, промислового чи саморобного типу, можуть залишатися активними протягом десятиліть та навіть більше після завершення бойових дій, загрожуючи життю місцевого населення.

Сучасні методи розмінування є надзвичайно небезпечними, трудомісткими і дорогими, бо здебільшого це ручна робота груп розмінування. Навіть із застосуванням спеціалізованого обладнання і саперної техніки, наприклад, металошукачів, людський фактор залишається головною причиною нещасних випадків під час розмінування. Тому пошук нових методів виявлення та розмінування є головним викликом як для наукової спільноти, так і для організацій, що беруть участь у постконфліктних гуманітарних місіях.

Внаслідок збройної агресії росії, Україна стала однією з країн з найвищим рівнем замінування у світі. За попередніми оцінками, 30 відсотків загальної площі України (174 000 км²) потенційно наражені на небезпеку, а гуманітарне розмінування займе десятиліття [1, с. 1]. Для розмінування територій нашої держави міжнародними партнерами надано низку машин механізованого розмінування (дані за 2023 рік) [2, с. 24]. Тому розмінування особливо актуальне питання для України, для вирішення якого необхідно залучення високотехнологічних та надійних методів та інструментів.

Існуючі технології виявлення, такі як метало-детектори і георадари, мають обмеження в умовах складного рельєфу і наявності неметалевих мін. Крім того, автономні операції у важкодоступних районах вимагають розробки роботизованих платформ з більш чутливими датчиками і системами управління. Необхідно розробляти і впроваджувати інноваційні рішення, в тому числі роботизовані системи, щоб прискорити операції з розмінування, знизити витрати і забезпечити безпеку.

Важливим питанням постає автономність роботи та мобільність технічного обладнання. У зонах конфлікту, особливо на пересіченій місцевості, віддалене керування може працювати не коректно. Для роботи в таких умовах потрібні такі системи, що здатні самостійно орієнтуватися на місцевості і приймати рішення відповідні до поставлених задач, що створює додатковий виклик для забезпечення ефективного розмінування. Щоб застосувати ці технології в реальних умовах треба розробляти більш гнучкі стандарти та технології-помічники, що спростять технологічну гібридизацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з питань розмінування та використання робототехнічних систем показує, що тема активно розвивається у зв'язку зі зростаючою потребою у зменшенні ризиків для життя людей та підвищенні ефективності гуманітарних місій.

Дослідження потреби у нових інструментах вказує, що нинішні підходи до розмінування з використанням собак, зондів, металошукачів і механічних пристроїв не можуть впоратися з глобальним очищенням від мін. Потрібні нові інструменти. Зокрема, у сферах обстеження мінних полів, ближнього виявлення мін, забезпечення якості після розмінування і створення нових технологій для забезпечення безпеки людей [3, с. 598].

Оскільки неможливо знешкодити всі міни в усьому світі, існує постійна потреба в більш ефективних і результативних операціях з розмінування за рахунок поліпшеного і належного збору даних, аналізу і використання нових технологій. Дослідження вказує на вдосконалення систем підтримки прийняття рішень для належного управління даними, обміну даними в загальній хмарі і визначення пріоритетності територій, які підлягають розмінуванню, що сприятиме підвищенню ефективності операцій з розмінування [4, с. 145].

Крім технічних та організаційних методів, дослідження пов'язані з розробкою сучасного методу алгоритмів планування руху для мобільних роботів необмеженої форми, які автоматично орієнтуються в районах для гуманітарного розмінування. Оскільки через форми конструкції робота спостерігається недосконале проходження траєкторії та слідування вказаному маршруту, що потребує удосконалення алгоритмів слідування шляху [5, с. 488].

Постановка завдання. Метою цього дослідження є підвищення ефективності та безпеки операцій з розмінування шляхом аналізу існуючих технологій розмінування та розробки методів їх застосування на роботизованих платформах. Це вимагає детального аналізу існуючих технологій розмінування, таких як металодетектори, георадари і магнітометри, з акцентом на їхню здатність точно виявляти наземні міни в різних умовах місцевості.

Виклад основного матеріалу. Виявлення небезпечних об'єктів на поверхні або під ґрунтом автоматичним або автоматизованим способом дозволить зберегти людські життя. Ці функції можна робити дистанційним чином керуючи не

лише робототехнічною платформою, а й положенням сенсорів [6, с. 26]. Передумовою діагностики ґрунту відповідними сенсорами є аналіз його типу. Якість розпізнавання небезпечних об'єктів корелюється із властивостями ґрунту, зокрема магнітними й електричними [7, с. 370].

У напрацюванні [8, с. 1] для виявлення небезпечних об'єктів використано одноплатний комп'ютер, котрий керує рухом робота й металодетектора засобами Android. Перевагами запропонованого підходу є використання для внутрішньої й зовнішньої навігації.

Крім металодетекторів виявлення аномалій ґрунту здійснюється за допомогою георадарів, що являють залежну від часу електромагнітну техніку, яка може надавати 2D або 3D радіолокаційні зображення надр з високою роздільною здатністю [9, с. 311].

Ще одним із сенсорів виявлення небезпечних об'єктів ґрунту є магнітометр, де магнітне поле вимірюється лише за допомогою відбитого сигналу від поляриметра [10, с. 2].

Визначивши основні види сенсорів проведемо аналіз існуючих платформ для визначення найбільш розповсюджених і вигідніших шляхів реалізації даних інструментів.

Типовий представник автоматизованих платформ є серія ANDROS, вагою 102 кг, використовується інженерним корпусом армії Ізраїлю та іншими підрозділами, Роботи серії ANDROS, що випускаються з 2005 року, в першу чергу призначені для утилізації боєприпасів, але можуть нести і летальну зброю із-за модульної конструкції сенсорних блоків [11, с. 1].

Деякі автоматизовані платформи конструктивно створені так, що мають два або більше роботизованих маніпулятори. Компактна гусенична система компанії ICOR класу Caliber, створена для використання двома особами служб швидкого реагування, які перевіряють і вилучають підозрілі пристрої в автобусах, поїздах і літаках [12, с. 3].

Провівши аналіз ринку США та Європи, популярності набирають саме гібридно-ходові платформи з мобільними колісно-гусеничними деталями для збільшення якості ходових характеристик зі зменшенням загальної маси та створення модульних корпусів для можливості створення більш різноманітних варіацій платформ від виробника. Типовим представниками є Cobham TeleMAX EOD/IEDD, Telerob EVO Hybrid та tEODor EVO [13, с. 1].

Беручи до уваги існування двох типів платформ та їх гібридів для забезпечення достатньої мобіль-

ності роботизованої платформи робимо висновок, що гусеничний хід є більш затребуваний незважаючи на вартість та складність ремонту. Механічна частина якісніше реагує на випадкові підриви та пошкодження, ніж колісна платформа та має кращі ходові якості. Але гусеничний хід є дорогим механізмом.

Здебільшого у робототехнічних комплексах використовується колісна база 4x4, але існують випадки, коли використовується механізми триколісного переміщення рис. 1 [14, с. 1].

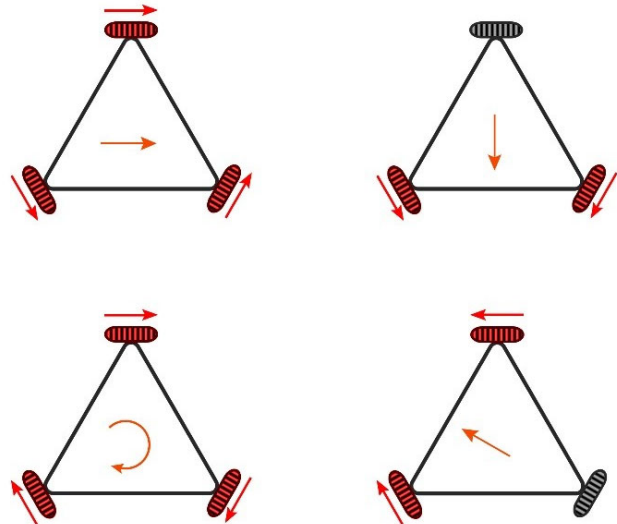


Рис. 1. Механізм переміщення робототехнічного комплексу [14, с. 1]

Тип конструкції робототехнічної платформи впливає на особливості монтування додаткових механізмів. Пропонована у попередній роботі робототехнічна платформа [15, с. 96], на колісній базі, має не широкі колеса й суттєвий дорожній кліренс. Це робить конструкцію надійною до можливого підриву, але цей факт потрібно досліджувати шляхом низки експериментів. Крім того платформа має унікальні електронні модулі керування, котрі потрібно налаштовувати й досліджувати їх функціонування.

Попри переваги запропонованого рішення лишається не у повному обсязі вирішена проблема щодо тестування систем керування додаткових механізмів робототехнічної платформи. Існуючі середовища монтажу й програмування контролерів, зокрема Wokwi, Tinkercad зорієнтовані на обмежену кількість інструментів й не містять у своїй структурі одноплатних комп'ютерів.

Одним з шляхів вирішення вказаної проблеми може бути використання симуляторів робототехніки, зокрема Gazebo simulator. У якості операційної системи, як один з варіантів, можна

використати Robot Operating System й додаткові бібліотеки.

Розвиток запропонованої ідеї потребує використання віртуальних технологій, з метою налаштування вхідних текстів програм. Наприклад, у напрацюванні [16, с. 2] створено цифровий прототип робота Pepper за допомогою інструментів ROS 2, зокрема Gazebo Sim, MoveIt 2, Rviz2. Для верифікації прототип робота діагностовано засобами Choregraphe. Але запропонований робот не мав спеціалізованих механізмів для транспортування чи виявлення вибухонебезпечних об'єктів.

Відоме використання удосконаленої ROS для роботів на орбіті, де запропоноване рішення було верифіковано у режимі реального часу [17, с. 3]. Це складно реалізоване завдання, де робот працює на орбіті. Як видно з напрацювань [16, 17] операційна система ROS є основою для побудови роботів різних типів.

Але існують ще більш удосконалені рішення, де основою є автопілот різних транспортних засобів, зокрема й робототехнічних платформ. Це дозволяє моделювати різні сценарії рухів робототехнічних платформ [18, с. 8099]. Крім того, автопілот використовується й для комунікації між кількома робототехнічними платформами.

Перевагами розглянутих інструментів досліджень є можливість використовувати їх безкоштовно, при цьому з можливістю моделювання різних сценаріїв дій робототехнічної платформи. Але прохідність антимінних роботизованих платформ ще не досягла тієї позначки, коли вибір є абсолютним. Проблем з переміщенням по різних типах місцевості залишається достатньо.

Для ефективного виявлення небезпечних об'єктів існують моделі прийняття рішень, котрі моделюють різні сценарії дій [19, с.2]. Прийняття рішень здійснюється як лінійними алгоритмами, так і генетичними. На ухвалені рішення щодо розмінування може вплинути земельний покрив й морфологічний індекс будівлі, що показано у напрацюванні [20, с.4]. За результатами дослідів отримано точність карти 90,67% на досліджуваній площині 643 660,28 м.

Враховуючи опрацьований матеріал, чітко зрозуміло, що робототехнічна платформа повинна мати інструменти розмінування, котрі слід досліджувати системно. Для цього варто обрати тип інструменту розмінування, середовище моделювання рухами робототехнічної платформи й інструмент ефективного прийняття рішень.

Висновки. Завдяки аналізу інструментів розмінування та способів їх застосування на роботизованих платформах визначено, що автоматизація процесу розмінування за допомогою таких платформ знижує ризики для команд розмінування та цивільного населення. Автономні системи та дистанційне керування роботами пришвидшують роботу та зменшують економічні витрати. Прикладом успішного рішення є роботизовані платформи серії ANDROS, які демонструють високу надійність і здатність адаптуватися до складних умов. Розробка та інтеграція сенсорних систем, таких як металодетектори, георадари, магнітометри може значно підвищити точність і надійність операцій з розмінування в різних умовах місцевості. Гібридизація ходу, модульність компонентів – зменшить ціновий поріг створення та модифікування існуючих платформ для розмінування.

Список літератури:

1. Розмінування України – потенційно забруднено більше 174 тис. кв. км території. *MRPL.CITY*. URL: <https://mrpl.city/news/view/v-ukraini-potentsijno-zabrudneno-minami-174-tis-kv-km-tse-chvert-teritorii-ukraini> (дата звернення: 04.09.2024).
2. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2023 році. 34 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/4/5/2/3/6/zvit-pro-osnovni-rezultati-diialnosti-dsns-u-2023-roci.pdf> (дата звернення: 04.09.2024).
3. Schäfer J., Kopf N., Häring I. Empirical risk analysis for Humanitarian Demining. *9th Future Security Research Conference* (Berlin, September 16–18, 2014). Berlin, 2014. P. 598–601. URL: <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-385383>
4. Humanitarian Demining and the Cloud: Demining in Afghanistan and the Western Sahara / P. Schmitz et al. *Service-Oriented Mapping*. 2019. P. 143–146. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-72434-8_7
5. Dakulovic M., Petrovic, I. Complete coverage path planning of mobile robots for humanitarian demining. *Industrial Robot*. 2012. Vol. 39, no. 5. P. 484–493. URL: <https://doi.org/10.1108/01439911211249779>
6. Masunaga S., Nonami K. Controlled Metal Detector Mounted on Mine Detection Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. Vol. 4, no. 2. P. 26. URL: <https://doi.org/10.5772/5692>
7. Takahashi K., Preetz H., Igel J. Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar – Soil characterisation and its verification by a field test. *Journal of Applied Geophysics*. 2011. Vol. 73, no. 4. P. 368–377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.02.008>
8. Sensor for Landmine Detection using Unmanned Vehicle Metal Detector and Mobile Computing Technology. *lupinepublishers.com*. URL: <https://lupinepublishers.com/environmental-soil-science-journal/>

fulltext/sensor-for-landmine-detection-using-unmanned-vehicle-metal-detector-and-mobile-computing-technology.ID.000194.php (дата звернення: 16.09.2024).

9. Wang M.L., Birken R. Sensing solutions for assessing and monitoring roads // Lynch J.P., Sohn H., Wang M.L. (eds.) *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (Second Edition). Woodhead Publishing. 2022. P. 299–330. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102706-6.00020-9>

10. Pradhan S. Three axis vector atomic magnetometer utilizing polarimetric technique. *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87, no. 9. Article no. 093105. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4962021>

11. Remotec Andros Titus. 2013. 4 p. URL: https://www.militarysystems-tech.com/sites/militarysystems/files/supplier_docs/Andros%20Titus.pdf (дата звернення: 21.09.2024).

12. MK3 CALIBER® - ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products. *ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products*. URL: <https://icortechology.com/robots/mk3-caliber/> (дата звернення: 24.09.2024).

13. Cobham Mission Systems - Military Systems and Technology. *International Defence & Aerospace Industry Portal*. URL: <https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/eod-iedd-equipment-eod-robots-and-service-vehicles/cobham-mission-systems-unmanned-systems> (дата звернення: 21.09.2024).

14. Get Rolling with Omni-Directional Wheels. *Servo Magazine*. URL: <https://www.servomagazine.com/magazine/article/get-rolling-with-omni-directional-wheels> (дата звернення: 24.09.2024).

15. Моделювання базової конструкції робототехнічної платформи / О. Лактіонов та ін. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. no. 3. P. 95–99. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-13>

16. Beyond Simulation: Unlocking the Frontiers of Humanoid Robot Capability and Intelligence with Pepper's Open-Source Digital Twin / H. Sekkat et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, iss. 14. Article no. e34456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34456>

17. Ramón J. L., Pomares J., Felicetti L. Task space control for on-orbit space robotics using a new ROS-based framework. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2023. Vol. 127. Article no. 102790. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102790>

18. ADArduPilot: an ArduPilot compatible adaptive autopilot* / P. Li et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, no. 2. P. 8097–8104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.964>

19. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 88. Article no. 101611. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>

20. Killeen J., Jaupi L., Barrett B. Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. Article no. 100766. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100766>

Yanko A.S., Laktionov O.I., Mykhailichenko O.V., Kruk O.O. ANALYSIS AND WAYS OF IMPLEMENTATION OF MINE CLEARING TOOLS ON A ROBOTIC PLATFORM

The article is devoted to the formation of theoretical foundations for the tools for demining on a robotic platform. The main goals of demining are effective, economical, reliable, fast and as safe as possible identification and clearance of ammunition and mines contaminated by explosive objects. The problem associated with demining is characterized by a huge variety of the nature of explosive ammunition, the complexity of weather conditions, as well as the type of terrain.

The article analyzes demining tools and examples of their use on robotic platforms. The importance of automation and the use of such systems in the processes of disposal of explosive objects, which pose a serious threat to the lives of people in the territories affected by military conflicts, is analyzed. The main focus is on the analysis of various sensor systems, namely metal detectors, ground-penetrating radars and chemical analyzers, to improve the accuracy of mine detection, as well as supporting technological mechanisms. The maximum use of multi-sensor systems in the demining process, namely the stage of detecting explosive objects, is an effective tool.

A comprehensive analysis of the urgency of the need to improve existing and develop new mobile robotic platforms for the implementation of the process of demining the area was carried out. Considered popular solutions involving robotic complexes, which are used for the disposal of ammunition and mines.

A comparative analysis of the main advantages of these robotic platforms in accordance with the conditions of use was carried out.

The importance of autonomy and mobility of such platforms for effective demining on terrain or in difficult weather conditions is revealed.

The results of the study emphasize the importance of further development of hybrid technologies and standards for simplifying the demining process and increasing its efficiency and reducing cost.

Key words: platform autonomy, explosive object, ground-penetrating radar, metal detector, movement mechanism, mine detector, multi-sensor system, robotic platform.