

О. А. Кузык, О. В. Придатко

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8151-2581> – О. А. Кузык

<https://orcid.org/0000-0002-0719-9118> – О. В. Придатко

✉ ostap.kuzyk@gmail.com

ПОКРАЩЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З ЛІДАРА У ЗАДИМЛЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Проблема. В умовах задимленого середовища та недостатньої видимості пристрої, які будують карту глибини – лідари не дають можливості побудувати якісне зображення, оскільки середовище ослаблює і розсіює лазерний промінь, який сканує простір. Тому підвищення якості зображення є актуальною проблемою, яка потребує вирішення.

Мета. Метою роботи є покращення зображень від лідара у задимленому просторі та за відсутності оптичних перешкод.

Методи досліджень. Експериментальні дослідження з використанням лідара Intel RealSense L515 [12], обробка даних програмним забезпеченням Intel RealSense SDK 2.0 та Python.

Основні результати дослідження. Зображення об'єкта у задимленому просторі, сформоване лідаром, є недостатньо чітким. Окремі пікселі відсутні, що не дає можливості сформувати повне уявлення про цей об'єкт. Для покращення зображення запропоновано метод, який базується на сумуванні послідовних кадрів зображень відео, утвореного в результаті сканування. Це дає можливість доповнити відсутні пікселі та отримати якісніше зображення об'єкта. Метод перевірено за допомогою відповідного алгоритму, реалізація якого на Python підтвердила ефективність, незважаючи на простоту. Метод ефективний і в умовах незадимленого середовища, якщо об'єкт відображений недостатньо чітко. Окреслено подальші кроки у напрямі покращення зображень, сформованих лідаром.

Висновки. Зображення, отримане з лідара у задимленому середовищі, має гіршу якість та потребує покращення. Кращу якість, проте теж недостатню, має зображення у незадимленому середовищі. Для випадку нерухомих лідара та об'єкта спостережень запропоновано метод і алгоритм покращення зображення шляхом сумування послідовних кадрів зображень. Запропоновано шляхи подальшого удосконалення зображення з лідара.

Ключові слова: активні оптичні системи, лідар, задимлене середовище, метод обробки даних, покращення зображення

О. А. Кузык, О. В. Придатко

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

LIDAR IMAGE IMPROVEMENT IN SMOKY ENVIRONMENTS

Introduction. In smoky environments and low visibility, lidar depth mapping devices do not provide a high-quality image, as the environment weakens and scatters the laser beam that scans the space. Therefore, improving image quality is an urgent problem to be solved.

Purpose. The aim of the work is to improve lidar images in a smoky space and in the absence of optical interference.

Methods. Experimental studies the Intel RealSense L515 lidar was used. Intel RealSense SDK 2.0 and Python software were used for data processing.

Results. The lidar image of an object in a smoky space is not clear enough. There are no individual pixels that form a complete picture of this object. To improve the image, a method based on the summation of successive frames of video images created as a result of scanning is proposed. This helps to supplement the missing pixels and get a better image of the object. The method was tested using the corresponding algorithm, the implementation of which on Python confirmed its effectiveness, despite its simplicity. The method is also effective in a non-smoky environment, if the object is not displayed clearly enough. Further steps in improving lidar images are outlined.

Conclusion. The image obtained from the lidar in a smoky environment is of poor quality and needs to be improved. The image in a smoke-free environment has better quality, but it is also insufficient. For the case of stationary lidar and observation object, a method and algorithm for image improvement by summing consecutive image frames is proposed. Ways for further improvement of the lidar image are proposed.

Key words: active optical systems, lidar, smoky environment, data processing method, image improvement

Вступ. Лідари є оптичними активними системами, які використовують для дистанційного зондування у різних галузях діяльності людини [1]. На сьогодні такі пристрої широко застосовують у робототехніці [2], автономних транспортних засобах [3], системах безпеки [4], спостереження [5] та інших подібних випадках. Принцип роботи лідара базується на вимірюванні відстаней від точок поверхонь простору, які скануються лазерним променем та вловлюються фоточутливим елементом [6].

Основними проблемами, з якими можна зіткнутися за умов використання лідарів, є залежність зображення від стану середовища сканування. У випадку туману [7], задимлення [8], запилення [9] у повітрі лазерний промінь може відбиватися від часток або диспергувати, що призводить до втрати окремих пікселів і погіршення якості зображення [10]. В результаті використання лідарів в умовах недостатньої видимості є обмеженим, зокрема зменшується відстань до об'єктів сканування [11]. В умовах задимленого середовища та інших умовах недостатньої видимості лідари не дають можливості побудувати якісне зображення, оскільки середовище ослаблює і розсіює лазерний

промінь, який сканує простір. Тому підвищення якості зображення є актуальною проблемою, яка потребує вирішення. Покращення зображення потрібне також у випадку незадимленого середовища, коли з причин великої відстані, наявності зовнішнього освітлення та ін. його якість теж не є достатньо високою.

Метою роботи є покращення зображень від лідара у задимленому просторі та відсутності оптичних перешкод за допомогою запропонованого методу, який базується на кластеризації послідовних зображень.

Методи досліджень. Під час експериментальних досліджень використовували лідар Intel RealSense L515 [12], отримання даних в цифровому вигляді здійснювали програмним забезпеченням Intel RealSense SDK 2.0.

Дослідження побудови зображень у задимленому просторі проводили з використанням намету циліндричної форми, довжиною 2,2 м, відкритого з обох боків (рис. 1). Відстані вимірювали за допомогою рулетки та лінійки з міліметровими поділками. Для утворення диму і заповнення намету використовували електричний димар, у якому продукувався дим внаслідок тління часток трухлявої деревини.



1



2

Рисунок 1 – Експериментальні дослідження лідара за відсутності задимлення 1 та в задимленому середовищі 2

Внутрішній об'єм намету наповнювали димом з використанням пристрою генерації диму. Мішень складалася з двох деталей у формі прямокутної трапеції, розміщених таким чином, що перпендикулярні до основ бічні сторони були поруч. Для порівняння аналогічні експерименти проведені за аналогічних умов, але без диму. Інформація щодо умов експериментального дослідження наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Умови проведення експериментального дослідження роботи лідара Intel RealSense L515 у задимленому та незадимленому середовищі

№ досліджу	Відстань від лідара до мішені, м	Відстань між частинами мішені, м	Висота мішені, м	Ширина частин мішені вгорі і внизу, м	Задимленість середовища
1	2,000 ± 0,001	0,06 ± 0,001	0,2 ± 0,001	0,05 ± 0,001 0,075 ± 0,001	так
2	2,102 ± 0,001	0,06 ± 0,001	0,2 ± 0,001	0,05 ± 0,001 0,075 ± 0,001	ні

Реалізацію запропонованого методу та відповідного алгоритму здійснювали у середовищі Python.

Результати досліджень

Дані з лідара через USB-порт передавалися на комп'ютер, на якому виконувався застосунок Intel RealSense Viewer v. 2.56.2. За допомогою застосунка отримані відеозображення були збережені у форматі *.bag. Із застосуванням програми rs-convert.exe, яка входить до складу пакету Intel RealSense SDK 2.0, отриманокадри відеозображення, які були конвертовані у файли даних формату *.csv. Для візуального перегляду також використовували відеозображення та зображення у форматі *.png. Кожен кадр у форматі *.csv заданий у вигляді таблиці розміром 640×480 пікселів. Значеннями цієї таблиці є виміряні лідаром відстані до об'єктів простору в полі його огляду. За результатами конвертування отримали функцію відстані від лідара до об'єктів у просторі

$$l = l(x, y, i, j), \quad (1)$$

де (x, y) – координати точки;

x – по горизонталі;

y – по вертикалі;

i – номер кадру;

j – номер досліджу.

Окрім вимірювання відстані лідар проводив знімання в інфрачервоному режимі, а кадри інфрачервоного зображення аналогічно виділялися. Інфрачервоний режим не дав можливості виявити зображення мішені.

Візуальний аналіз відеозображень, переглянутих у Intel RealSense Viewer v. 2.56.2, виявив, що у задимленому середовищі мішень відображається набагато гірше, ніж у незадимленому (рис. 2).

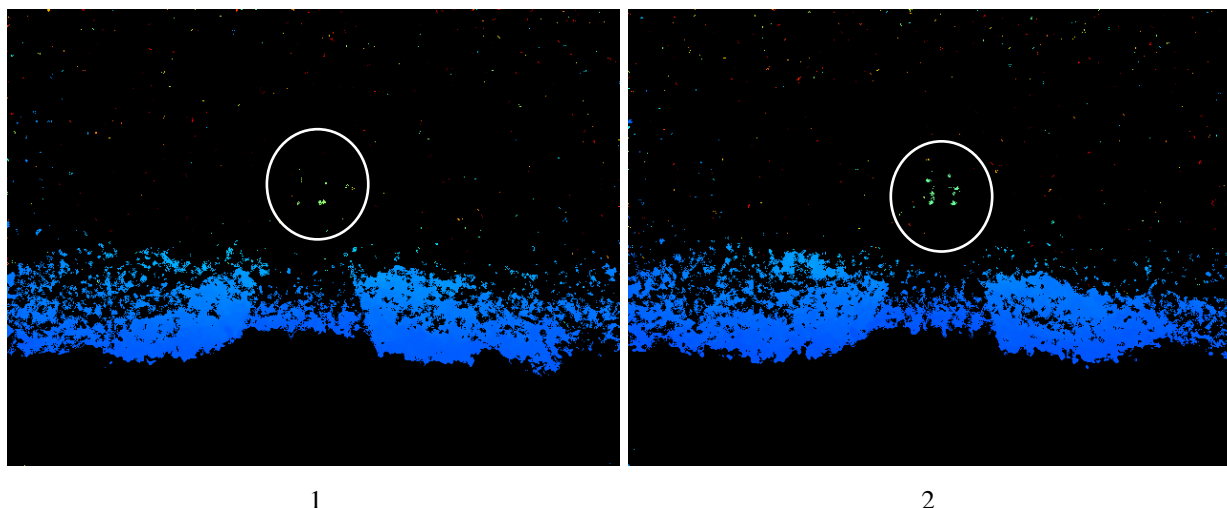


Рисунок 2 – Необроблені кадри зображень, отримані з лідара, у форматі *.png в задимленому 1 та незадимленому 2 середовищі, мішень видно як групу точок зеленого кольору, виділену колом

Зауважимо, що окремі пікселі при зміні кадрів то з'являлися, то пропадали. Загалом на кожному окремо вибраному кадрі мішень чітко не проглядалася. Також спостерігався значний «шум» на об'єктах, розташованих ближче.

Побудувавши за даними файлів *.csv 3d зображення (рис. 3), проведемо їх попередній візуальний аналіз.

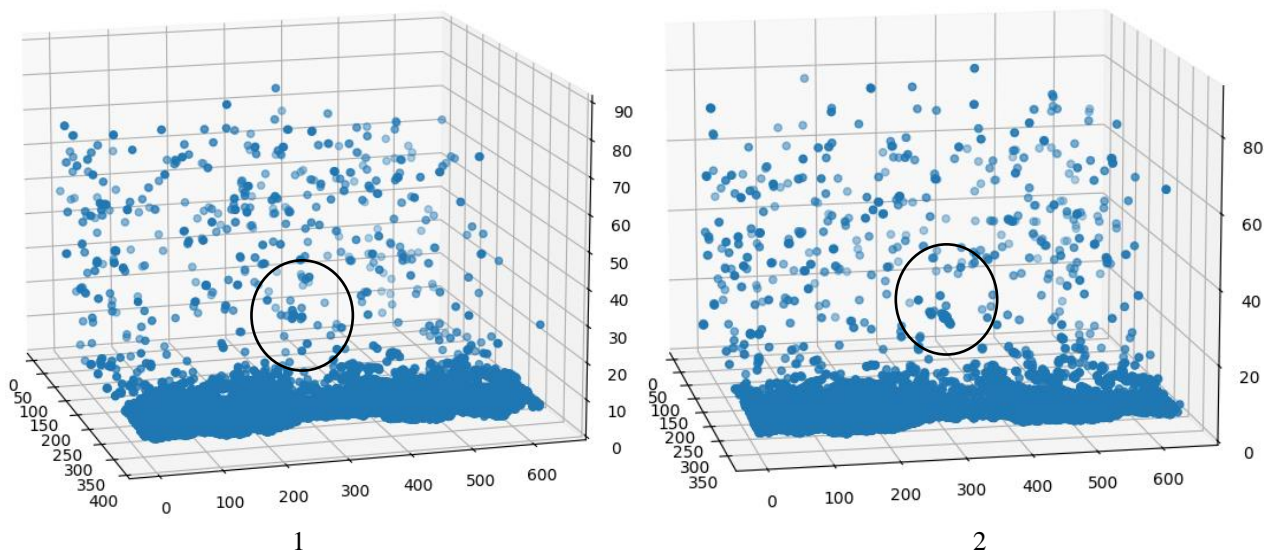


Рисунок 3 – 3D зображення масиву точок, побудованих лідаром у задимленому 1 та незадимленому 2 середовищі, мішень як група пікселів, виділена колом

Як видно з рис. 3, у задимленому просторі зашумлення є більшим, ніж у незадимленому, а мішень менш помітною, оскільки вона відображається меншою кількістю точок. Також меншою кількістю точок зображені елементи простору, розташовані поблизу камери. Причиною цього, як і гіршого відображення мішені, є дисперсія лазерного променя лідара від часток диму у задимлення просторі. Зауважимо, що на рис. 3 зображення простору подано у декартовій системі координат і не враховує кут огляду лідара.

Для отримання зображення мішені потрібно видалити шум і залишити згруповані у кластери

групи точок. До методів кластеризації з одночасним прибиранням шуму належать DBSCAN, OPTICS та DENCLUE, причому DBSCAN має найменший рівень складності $O(n \lg n)$ [13]. Реалізований на Python метод DBSCAN дає можливість виокремити групи точок, а також видалити шуми. Параметрами методу є максимальна відстань до сусідньої точки, яку приєднують до кластера, і мінімальна кількість точок для об'єднання в один кластер. Вказані параметри підбирають експериментально відповідно до очікуваного результату.

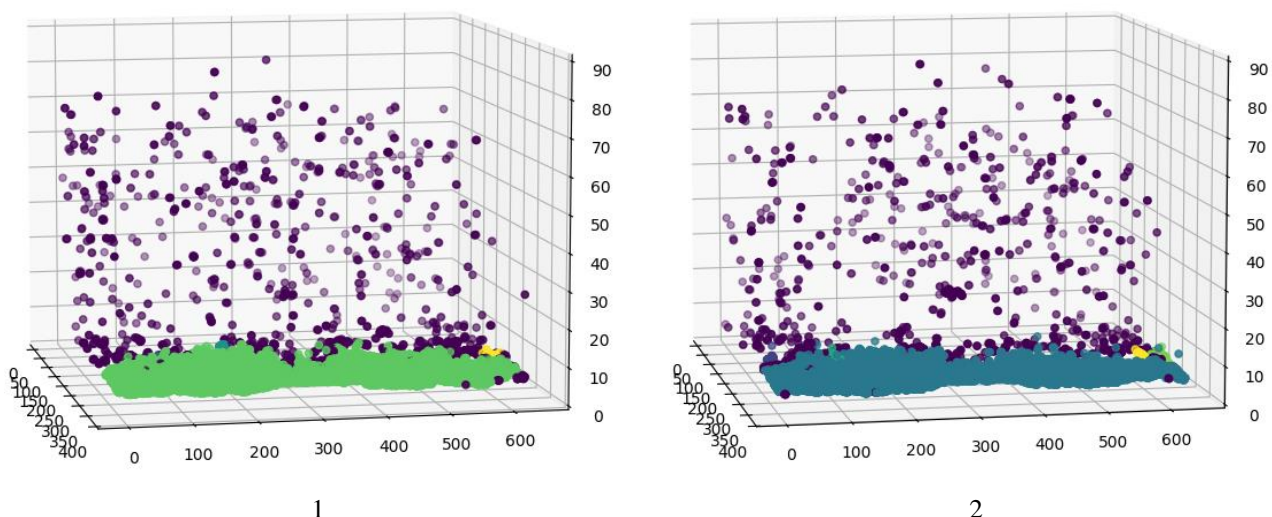


Рисунок 4 – Реалізація методу DBSCAN для задимленого 1 і незадимленого 2 середовищ на основі одного кадру

Як у випадку задимлення, так і за його відсутності, кластер, що відображає мішень, має пропущені точки. Тому за наявності одного кадру інформації про об'єкт, який сканується лідаром, може бути недостатньо. Але якщо ми маємо відеозображення (декілька послідовних кадрів),

то різні кадри через випадковий характер розсіювання можуть також містити недостатньо точок для зображення об'єкта. Але при цьому можуть відобразитися інші точки цього об'єкта. З урахуванням цього для покращення якості зображення об'єктів сканування лідаром як в

задимленому, так і незадимленому середовищі пропонуємо метод, який полягає у сумуванні інформації з послідовних кадрів зображення, оброблених методом DBSCAN, під час якого точки зображення об'єкта будуть накопичуватися і в результаті цього зображення буде суцільним і формуватиметься з більшої кількості точок і меншої кількості прогалів. Сумування з накопиченням здійснюють поточною з перебігом координатами (x, y) , додаючи з наступного кадру точки за умови, що на попередньому кадрі (декількох кадрах) така точка була відсутня (відстань дорівнює 0).

Позначимо $l_i^*(x, y, j)$ функцію відстаней, яка утворена внаслідок додавання i кадрів.

Реалізація запропонованого методу здійснюється алгоритмом, який для результатів

кожного з дослідів j наведено на рис. 5. Вхідними даними є функція відстані l (див (1)), x_{max}, y_{max} – розмірність масиву точок, Δ – мінімальна кількість точок, що додаються до кадру на відповідному кроці ітерації i , за якої сумування припиняється, ε – максимальна відстань, за якої дві точки об'єднуються в один кластер, k – мінімальна кількість точок, які може містити кластер. Результатом роботи алгоритму є функція l_i^* , кількість кадрів i , за якої досягнуто результат, та масив кількостей точок у кожному кластері m . У алгоритму використовується процедура DBSCAN, вхідними параметрами якої є l, i, ε, k , а на виході буде модифікований масив l та масив кількостей точок у кожному кластері.

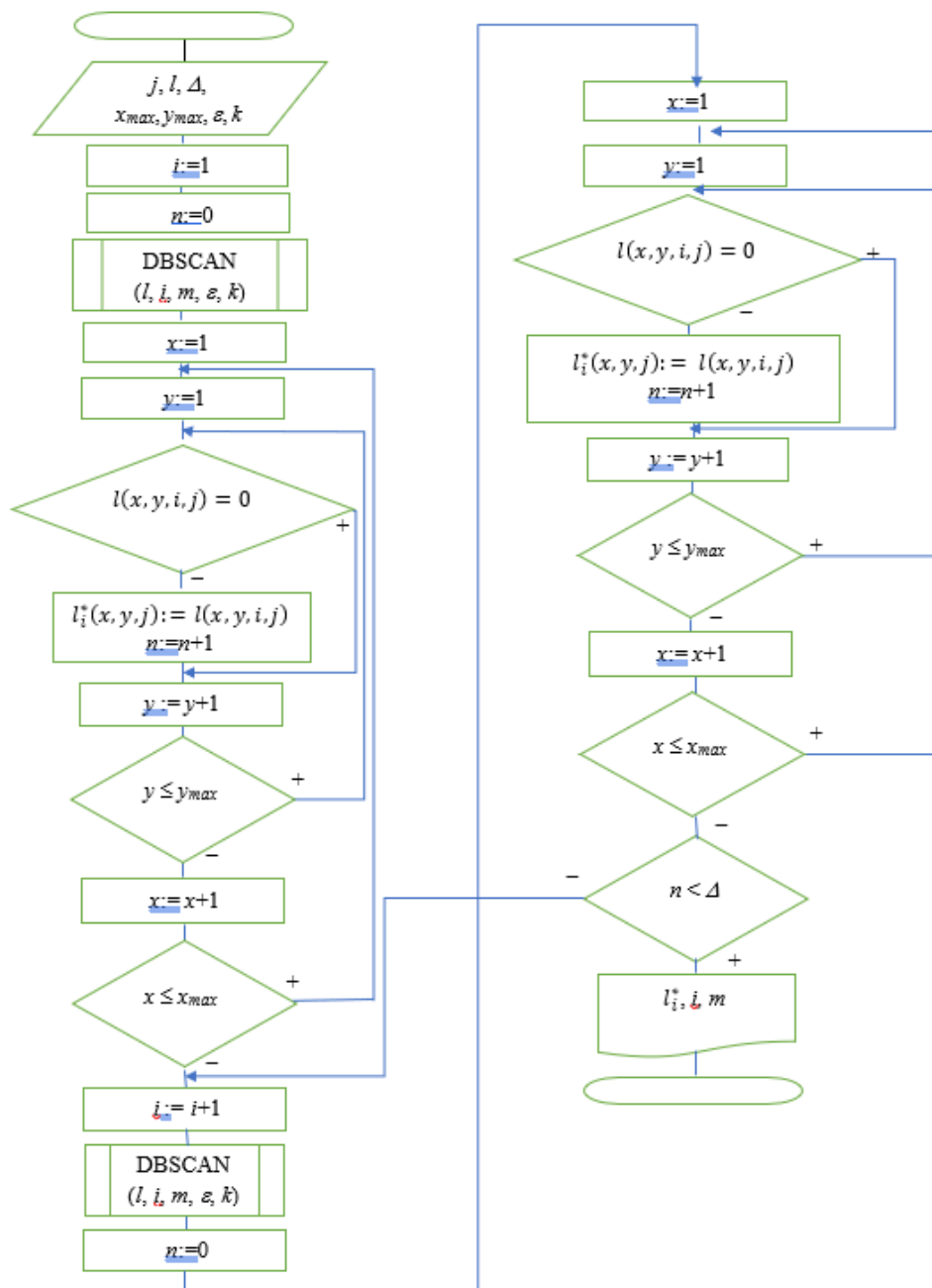


Рисунок 5 – Алгоритм реалізації методу сумування

Після завершення алгоритму отримуємо функція l_i^* , яка містить прокластеризоване та покращене зображення.

Реалізували алгоритм у середовищі Python. Результат роботи алгоритму наведено на рис. 6, на якому набагато краще відображається мішень у задимленому та незадимленому середовищі.

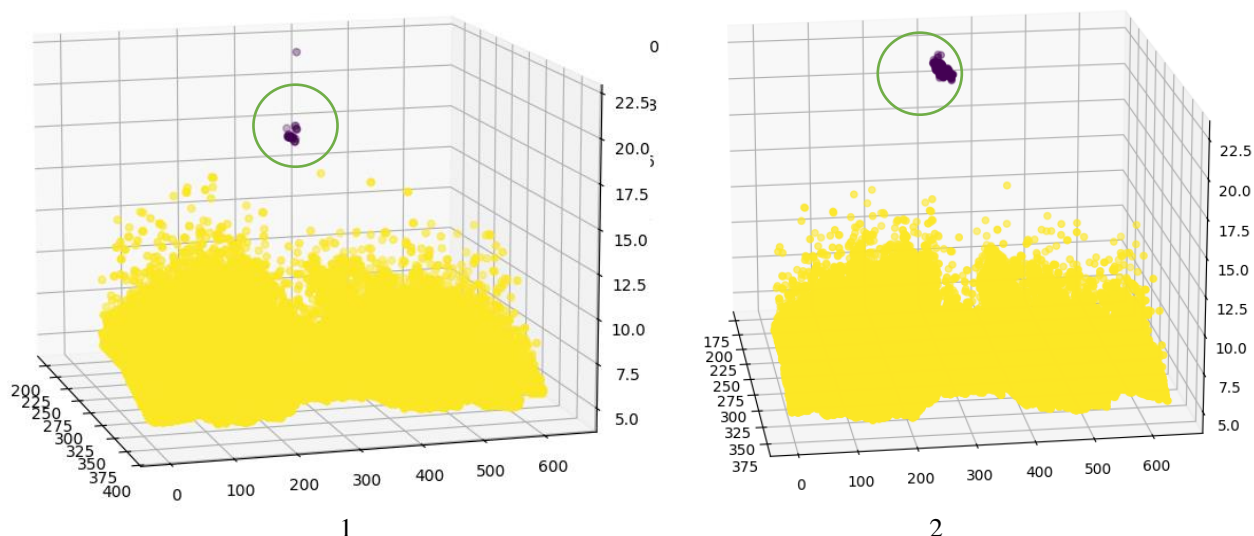


Рисунок 6 – Результати покращення зображення методом сумування у незадимленому 1 та задимленому 2 середовищі

Числові характеристики, отримані за результатами реалізації запропонованого методу, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Числові характеристики результатів роботи алгоритму

№ дослідю, j	Задимленість середовища	Кількість кадрів, за яких досягнуто результат, i	Кількість точок у кластері (мішень), $m(0)$	Кількість точок в іншому кластері, $m(1)$
1	так	33	43	61415
2	ні	37	281	57988

Обговорення результатів досліджень

Порівнюючи зображення у задимленому та незадимленому середовищі, отримане внаслідок реалізації методу додавання (рис. 6), з вихідним (рис. 3) прокластеризованим методом DBSCAN одним кадром (рис. 4), можна зробити висновок, що метод DBSCAN дає можливість виокремити шуми та виділити окремі кластери, навіть на основі одного кадру. Проте зображення об'єкта (мішені), особливо у випадку задимлення, містить пропущені точки, що не дає можливості сформувати повну картину про цей об'єкт. Запропонований метод сумування дає значно чіткіше зображення об'єкта, оскільки містить більшу кількість точок (табл. 2). Для задимленого середовища результат покращення зображення досягнутий за дещо меншу кількість ітерацій (доки додана кількість точок не стане меншою за $\Delta=100$), а кількість точок, які відображають мішень, майже в 7 разів менша у порівнянні з незадимленим середовищем.

Проблемами під час реалізації запропонованого методу є встановлення мінімальної кількості точок у кластері та

максимальної відстані між точками, які зараховують до одного кластера. Ці параметри встановлюють експериментальним методом або із застосуванням машинного навчання, якщо інформація про форму та розміри об'єкта наперед відома. Іншою проблемою є оптимізація методу, що дозволить зменшити кількість кадрів для покращення зображень, що важливо для систем відображення інформації в реальному часі. Оскільки запропонований метод придатний для обробки відеозображень статичних об'єктів, також доцільним є його модернізація з урахуванням взаємних переміщень лідача і об'єкта.

Висновки

Зображення, отримане з лідача у задимленому середовищі, має гіршу якість та потребує покращення. Кращу якість, проте з відсутніми окремими точками, має зображення у незадимленому середовищі.

Для нерухомих лідача та об'єкта спостережень запропоновано метод і алгоритм покращення зображення шляхом сумування послідовних кадрів відеозображень, який дає можливість збільшити якість завдяки додаванню

відсутніх точок, що зображують об'єкт. В результаті реалізації методу у задимленому середовищі отримано зображення об'єкта спостереження у вигляді окремого кластера з 43 точок внаслідок обробки 33 кадрів. У незадимленому середовищі до складу відповідного кластера увійшло 281 точка в результаті обробки 37 кадрів, що майже в 7 разів більше, ніж для задимленого середовища.

Запропоновано шляхи подальшого удосконалення якості зображення з лідара.

Список літератури:

1. Dong P., Chen Q. *LiDAR Remote Sensing and Applications* (1st ed.). CRC Press, 2017. 220 p. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>.

2. Yue X., Zhang Y., Chen J., Chen J., Zhou X., He M. (2024). LiDAR-based SLAM for robotic mapping: state of the art and new frontiers. *Industrial Robot*. 2024. 51(2). P. 196-205. <https://doi.org/10.1108/IR-09-2023-0225>.

3. Li Y., Ibanez-Guzman, J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. 37(4). P. 50-61. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2973615>.

4. Church P., Grebe C., Matheson J., Owens B. Aerial and surface security applications using lidar. *Laser Radar Technology and Applications*. 2018. XXIII. 10636. P. 27-38. <https://doi.org/10.1117/12.2304348>.

5. Hasan, M., Hanawa, J., Goto, R., Suzuki, R., Fukuda, H., Kuno, Y., & Kobayashi, Y. (). LiDAR-based detection, tracking, and property estimation: A contemporary review. *Neurocomputing*, 2022. 506. P. 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.07.087>.

6. Raj T., Hanim Hashim F., Baseri Huddin A., Ibrahim M. F., Hussain A. A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*. 2020. 9(5). P. 741. <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>.

7. Li Y., Duthon P., Colomb M., Ibanez-Guzman J. What happens for a ToF LiDAR in fog?. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. 22(11), P. 6670-6681. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.299807>.

8. Noh, C., & Kim, A. (). Adaptive LiDAR-Radar Fusion for Outdoor Odometry Across Dense Smoke Conditions. *ArXiv preprint*. 2024 arXiv:2403.17441. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.17441>.

9. Afzalaghaeinaeini A., Seo J., Lee D., Lee H. Design of Dust-Filtering Algorithms for LiDAR Sensors Using Intensity and Range Information in Off-Road Vehicles. *Sensors*. 2022. 22(11). 4051. <https://doi.org/10.3390/s22114051>.

10. Zhang G. T., Verbree E., Wang X. J. An Approach to Map Visibility in the Built Environment

From Airborne LiDAR Point Clouds. *IEEE Access*, 2021. 9. P. 44150-44161.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066649>.

11. Miclea R. C., Dughir C., Alexa F., Sandru F., Silea I. Laser and LIDAR in a system for visibility distance estimation in fog conditions. *Sensors*. 2020. 20(21). 6322. <https://doi.org/10.3390/s20216322>.

12. Intel RealSense LiDAR Camera. 2024. URL: <https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-1515/>

13. Ezugwu, A. E., Ikotun, A. M., Oyelade, O. O., Abualigah, L., Agushaka, J. O., Eke, C. I., & Akinyelu, A. A. (). A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. 110. 104743. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104743>.

References:

1. Dong, P., & Chen, Q. (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>.

2. Yue, X., Zhang, Y., Chen, J., Chen, J., Zhou, X., & He, M. (2024). LiDAR-based SLAM for robotic mapping: state of the art and new frontiers. *Industrial Robot*, 51(2), 196-205. <https://doi.org/10.1108/IR-09-2023-0225>.

3. Li, Y., & Ibanez-Guzman, J. (2020). Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(4), 50-61. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2973615>.

4. Church, P., Grebe, C., Matheson, J., & Owens, B. (2018). Aerial and surface security applications using lidar. *Laser Radar Technology and Applications XXIII*, 10636, 27-38. <https://doi.org/10.1117/12.2304348>.

5. Hasan, M., Hanawa, J., Goto, R., Suzuki, R., Fukuda, H., Kuno, Y., & Kobayashi, Y. (2022). LiDAR-based detection, tracking, and property estimation: A contemporary review. *Neurocomputing*, 506, 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.07.087>.

6. Raj, T., Hanim Hashim, F., Baseri Huddin, A., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*, 9(5), 741. <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>.

7. Li, Y., Duthon, P., Colomb, M., & Ibanez-Guzman, J. (2020). What happens for a ToF LiDAR in fog?. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(11), 6670-6681. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.299807>.

8. Noh, C., & Kim, A. (2024). Adaptive LiDAR-Radar Fusion for Outdoor Odometry Across Dense Smoke Conditions. *ArXiv preprint arXiv:2403.17441*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.17441>.

9. Afzalaghaeinaeini, A., Seo, J., Lee, D., & Lee, H. (2022). Design of Dust-Filtering Algorithms for LiDAR sensors Using Intensity and Range Information in Off-Road Vehicles. *Sensors*, 22(11), 4051. <https://doi.org/10.3390/s22114051>.
10. Zhang, G. T., Verbree, E., & Wang, X. J. (2021). An Approach to Map Visibility in the Built Environment From Airborne LiDAR Point Clouds. *IEEE Access*, 9, 44150-44161. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066649>.
11. Miclea, R. C., Dughir, C., Alexa, F., Sandru, F., & Silea, I. (2020). Laser and LIDAR in a system for visibility distance estimation in fog conditions. *Sensors*, 20(21), 6322. <https://doi.org/10.3390/s20216322>.
12. Intel RealSense LiDAR Camera. (2024). URL: intelrealsense.com/lidar-camera-l515/
13. Ezugwu, A. E., Ikotun, A. M., Oyelade, O. O., Abualigah, L., Agushaka, J. O., Eke, C. I., & Akinyelu, A. A. (2022). A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 110, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104743>.

© О. А. Кузик, О. В. Придатко, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 05.12.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.